



Tersedia secara online di <http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jatiunik/index>

JATI UNIK

Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri



Perencanaan Mitigasi Risiko Berbasis *Event Tree Analysis* untuk Meningkatkan Keandalan PLTGU

Sastya Adzani Syahbania^{*1}, I Ketut Gunarta²

sastyaadzanis@gmail.com^{*1}, gunarta@ie.its.ac.id²

^{1,2}Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Informasi Artikel

Riwayat Artikel :

Received : 24 – Juli - 2025

Revised : 28 – Juli - 2025

Accepted : 13 – Februari - 2026

Keywords :

Critical Equipment; ETA;
Failure Probability;
Reliability Levels; Cycle
Power Plants

Abstract

Repeated failures of critical equipment at power generation facilities can significantly disrupt operations and reduce system availability. In 2023, PT X's Block 1 Unit A Combined Cycle Power Plant recorded its lowest Equivalent Availability Factor (EAF) of 84.95% due to repeated failures of several critical components. Previous studies have identified these equipment failures and analyzed their reliability levels. This study aims to develop mitigation scenarios to reduce operational risks using Event Tree Analysis (ETA). ETA uses failure probabilities from previous reliability assessments as initiating events to model potential event sequences and evaluate their consequences. The results show that each tool generates between 4 and 16 scenario pathways, depending on the number of mitigation programs. All proposed mitigation scenarios successfully reduced the overall risk level to "Low" across all seven critical pieces of equipment. This study concludes that ETA provides an effective way to systematically organize mitigation efforts based on failure probability and consequence analysis. The contribution of this study is the development of a scenario-based mitigation framework using ETA to support decision-making and enhance operational reliability at combined-cycle power plants.

Abstrak

Kegagalan berulang pada peralatan kritis di fasilitas pembangkit listrik dapat secara signifikan mengganggu operasional dan mengurangi ketersediaan sistem. Pada tahun 2023, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Blok 1 Unit A PT X mencatat *Equivalent Availability Factor* (EAF) terendah sebesar 84,95% akibat kegagalan berulang pada beberapa komponen kritis. Studi sebelumnya telah mengidentifikasi kegagalan peralatan ini dan menganalisis tingkat keandalannya. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan skenario mitigasi guna mengurangi risiko operasional menggunakan *Event Tree Analysis* (ETA). ETA menggunakan probabilitas kegagalan dari penilaian keandalan sebelumnya sebagai peristiwa pemicu untuk memodelkan urutan peristiwa potensial dan mengevaluasi konsekuensinya. Hasil menunjukkan bahwa setiap peralatan menghasilkan antara 4 hingga 16 jalur skenario, tergantung pada jumlah program mitigasi. Semua skenario mitigasi yang diusulkan berhasil mengurangi tingkat risiko keseluruhan menjadi "Rendah" pada semua tujuh peralatan kritis. Studi ini menyimpulkan bahwa ETA menyediakan cara efektif untuk secara sistematis

Untuk melakukan sitasi pada penelitian ini dengan format: S. A. Syahbania and I. K. Gunarta, "Perencanaan Mitigasi Risiko Berbasis Event Tree Analysis untuk Meningkatkan Keandalan PLTGU," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri (JATI UNIK)*, vol. 9, no. 2, pp. 14–24, 2026.

mengorganisir upaya mitigasi berdasarkan analisis probabilitas kegagalan dan konsekuensi. Kontribusi studi ini adalah pengembangan kerangka kerja mitigasi berbasis skenario menggunakan ETA untuk mendukung pengambilan keputusan dan meningkatkan keandalan operasional di pembangkit listrik tenaga gas dan uap.

1. Pendahuluan

Kegagalan pada peralatan kritis dapat berdampak signifikan terhadap kelangsungan operasional dan ketersediaan sistem pembangkit listrik. Untuk meningkatkan performa dan keandalan sistem pembangkitan, dibutuhkan evaluasi menyeluruh terhadap kinerja peralatan, salah satunya melalui analisis probabilitas dan distribusi kegagalan [1], [2]. Pendekatan berbasis probabilitas, seperti *Markov Chain*, juga telah digunakan untuk menganalisis keandalan sistem instrumentasi sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan [3]. Ini menjadi dasar penting dalam merumuskan strategi perawatan yang lebih efisien dan tepat sasaran [4].

Pada tahun 2023, Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Blok 1 yang dioperasikan oleh PT X mencatat *Equivalent Availability Factor* (EAF) terendah sebesar 84,95% akibat tingginya durasi *downtime* pada sejumlah peralatan kritis [5], [6]. Hal ini mencerminkan adanya kelemahan dalam pemahaman risiko kegagalan dan efektivitas mitigasi yang telah diterapkan. Untuk itu, dibutuhkan pendekatan perencanaan mitigasi risiko yang lebih terstruktur, berbasis data historis, dan mempertimbangkan probabilitas kegagalan aktual [7], [8]. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) mengintegrasikan turbin gas dan turbin uap untuk mencapai efisiensi termal yang tinggi dengan memanfaatkan gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin uap. Komponen utamanya meliputi *Gas Turbine* (GT), *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG), dan *Steam Turbine* (ST) [16]. Kinerja pembangkit biasanya dievaluasi menggunakan *Equivalent Availability Factor* (EAF), yang mencerminkan ketersediaan operasionalnya dengan memperhitungkan waktu *downtime* akibat kegagalan, pemeliharaan, dan peristiwa penurunan daya [5], [17].

Menurut ISO 31000 [18], manajemen risiko adalah proses terstruktur dan berulang yang membantu organisasi mengidentifikasi, menilai, dan menangani risiko melalui kegiatan yang terkoordinasi. Penilaian risiko - termasuk identifikasi, analisis (kualitatif/kuantitatif), dan evaluasi terhadap kriteria yang telah ditetapkan [19]. *Event Tree Analysis* (ETA) adalah metode *decision tree* yang digunakan untuk memetakan konsekuensi yang mungkin terjadi dari suatu peristiwa pemicu (*initiating event*) dan mengevaluasi efektivitas

tindakan mitigasi terhadap skenario risiko yang mungkin terjadi [20], [21]. *Event Tree Analysis* (ETA) telah diuraikan untuk mencakup identifikasi peristiwa pemicu (*initiating event*), tindakan mitigasi, penggambaran diagram *event tree*, deskripsi urutan peristiwa risiko, dan perhitungan probabilitas dan konsekuensi [22].

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa ETA umumnya digunakan untuk menilai skenario risiko akibat kecelakaan dan potensi eskalasi bahaya dalam proses industri. Zafirovski et al. (2021) menggunakan ETA untuk mengidentifikasi jalur risiko paling kritis pada proyek terowongan dengan probabilitas kejadian sekitar 0,02% [10]. Al Saffar dan Ezzat (2020) menunjukkan bahwa *human error* (kesalahan manusia) berkontribusi sekitar 50% dari total probabilitas kegagalan pada sistem pendingin [14]. Sementara itu, Veljanovski dan Čepin (2024) menerapkan ETA pada pembangkit listrik untuk menilai dampak kegagalan terhadap biaya operasional dan keandalan sistem [15]. Namun, penggunaan metode ini untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan pemeliharaan peralatan berbasis keandalan historis masih belum banyak dikembangkan.

Penilaian risiko lanjutan, metode *Event Tree Analysis* (ETA) dapat digunakan untuk memodelkan kemungkinan jalur kejadian setelah peristiwa pemicu tertentu. ETA menawarkan pendekatan sistematis untuk mengevaluasi efektivitas program mitigasi dengan mempertimbangkan kombinasi probabilitas dan konsekuensi dari setiap jalur skenario yang mungkin terjadi [9], [10], [11]. Efektivitas strategi mitigasi risiko memainkan peran penting dalam menurunkan probabilitas kegagalan peralatan [12]. Semakin tepat dan efektif tindakan mitigasi yang diterapkan, maka semakin kecil kemungkinan terjadinya kegagalan. Selain itu, mitigasi yang berhasil juga dapat mempercepat proses perbaikan dan berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem secara keseluruhan [13]. Selain banyak digunakan di sektor energi dan industri proses berisiko tinggi, ETA juga terbukti efektif dalam membantu pengambilan keputusan untuk manajemen risiko yang kompleks.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa ETA umumnya digunakan untuk menilai skenario risiko akibat kecelakaan dan potensi eskalasi bahaya dalam proses industri. Namun, penggunaan metode ini untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan pemeliharaan peralatan berbasis keandalan historis masih belum banyak dikembangkan [10], [14], [15]. Studi ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menerapkan ETA untuk menyusun skenario mitigasi risiko berdasarkan nilai probabilitas kegagalan peralatan sebagai peristiwa pemicu utama (*initiating event*).

Oleh karena itu, studi ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menerapkan ETA untuk menyusun skenario mitigasi risiko berdasarkan nilai probabilitas kegagalan peralatan,

yang ditentukan melalui analisis keandalan berbasis data historis kegagalan aktual dari sistem pembangkit. Nilai probabilitas kegagalan tersebut digunakan sebagai peristiwa pemicu utama (*initiating event*) dalam pengembangan skenario mitigasi risiko. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan rancangan mitigasi yang terukur dan sesuai dengan kondisi operasional nyata di lapangan.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan skenario mitigasi risiko pada peralatan kritis di PLTGU Blok 1 PT X menggunakan pendekatan *Event Tree Analysis* (ETA). Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan probabilitas kegagalan berbasis data historis kegagalan aktual tahun 2018-2024 pada PLTGU Blok 1 PT X. Selain itu, dampak kegagalan peralatan terhadap operasional pembangkit juga dipertimbangkan sehingga hasil penelitian ini dapat mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih adaptif dan berbasis bukti.

2. Metode Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk mengembangkan skenario mitigasi risiko menggunakan *Event Tree Analysis* (ETA) pada peralatan kritis di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT X. Analisis ini didasarkan pada probabilitas kegagalan numerik dan penilaian konsekuensi, dengan tujuan mengidentifikasi jalur mitigasi risiko yang paling efektif. *Expert judgement* dan data operasional historis juga digunakan untuk membangun dan mengevaluasi berbagai skenario kegagalan dan hasilnya.

2.2 Populasi dan Sampel

Penelitian ini berfokus pada peralatan yang beroperasi di PLTGU Blok 1 PT X. Dari populasi tersebut, tujuh peralatan kritis dipilih sebagai sampel penelitian. Peralatan-peralatan ini diidentifikasi melalui analisis keandalan sebelumnya menggunakan metode *Reliability Block Diagram* (RBD), yang dipilih karena kontribusi signifikan mereka terhadap total *downtime* dan kompleksitas kebutuhan mitigasi

2.3 Instrumen Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa instrumen untuk mendukung pengembangan skenario mitigasi risiko melalui *Event Tree Analysis* (ETA). Instrumen utama meliputi:

- a. Diagram ETA, yang dibuat untuk setiap unit peralatan kritis untuk memetakan kemungkinan kegagalan dan jalur mitigasi.
- b. Data keandalan historis, digunakan untuk menentukan probabilitas kegagalan untuk setiap peristiwa pemicu (*initiating event*).

- c. Pendapat ahli, diterapkan untuk memperkirakan probabilitas bersyarat hasil mitigasi di mana data empiris tidak tersedia serta menilai tingkat konsekuensi yang tersisa di setiap jalur skenario mitigasi.
- d. Skala konsekuensi kualitatif, untuk mengklasifikasikan dampak setiap skenario berdasarkan *downtime* dan *opportunity loss*.
- e. Matriks risiko, untuk menggabungkan tingkat probabilitas dan konsekuensi menjadi tingkat risiko yang dikategorikan.

2.4 Prosedur Penelitian

Bagian ini menjelaskan proses pengumpulan dan analisis data yang digunakan untuk mengembangkan skenario mitigasi risiko berbasis metode Event Tree Analysis (ETA). Data dalam studi ini diperoleh dari beberapa sumber utama, yaitu data kegagalan historis peralatan PLTGU PT X selama periode 2018–2024 yang memuat informasi mode kegagalan untuk menentukan aksi mitigasi yang sesuai, hasil analisis keandalan sebelumnya menggunakan metode *Reliability Block Diagram* (RBD) guna mengidentifikasi peralatan yang paling kritis, serta pendapat ahli yang diperoleh melalui diskusi dengan tenaga kerja berpengalaman untuk memperkirakan probabilitas keberhasilan program mitigasi dan mengevaluasi konsekuensi operasional pada kondisi di mana data empiris tidak tersedia.

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Pertama, dilakukan pembangunan diagram ETA untuk masing-masing dari tujuh unit peralatan kritis yang telah dipilih. Setiap diagram diawali dengan peristiwa kegagalan sebagai *initiating event*, kemudian dikembangkan ke dalam cabang-cabang kemungkinan hasil mitigasi, baik dalam kondisi sukses maupun gagal, sehingga membentuk berbagai jalur skenario risiko. Selanjutnya, dilakukan perhitungan probabilitas pada setiap cabang kejadian untuk memperoleh nilai probabilitas akhir dari masing-masing skenario, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam evaluasi efektivitas strategi mitigasi risiko yang diusulkan. Probabilitas setiap jalur skenario dihitung dengan mengalikan probabilitas peristiwa pemicu dengan probabilitas bersyarat setiap hasil mitigasi. Perhitungan probabilitas kegagalan pada jalur skenario lengkap mengikuti rumus berikut[23]:

$$P_{jalur} = P_{pemicu} \times \prod_{i=1}^n P_{m(i)} \quad ..(1)$$

Di mana:

P_{jalur} = Probabilitas jalur skenario lengkap

P_{pemicu} = Probabilitas pemicu atau probabilitas kegagalan setiap peralatan

$P_{m(i)}$ = Probabilitas bersyarat dari opsi mitigasi di setiap jalur

Dampak atau konsekuensi dari setiap skenario dievaluasi berdasarkan dua aspek: durasi *downtime* dan biaya *opportunity loss*. Nilai kuantitatif ini kemudian diklasifikasikan

ke dalam lima tingkat kualitatif, yaitu: tidak signifikan, *minor*, *medium*, signifikan, dan sangat signifikan. Matriks risiko untuk mengevaluasi dan mengkategorikan tingkat risiko setiap skenario dengan menggabungkan nilai probabilitas kegagalan jalur dan konsekuensi, terdiri dari lima tingkat untuk probabilitas dan konsekuensi, menghasilkan kategori risiko mulai dari rendah hingga ekstrem. Pemilihan jalur mitigasi dengan tingkat risiko terendah diidentifikasi untuk setiap unit peralatan. Jalur-jalur terpilih ini direkomendasikan sebagai tindakan mitigasi prioritas, dengan mempertimbangkan periode implementasi jangka pendek (dalam satu tahun operasional).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Peristiwa Pemicu dan Probabilitas Kegagalan Peralatan

Peristiwa pemicu dalam ETA didefinisikan sebagai probabilitas kegagalan tahunan untuk setiap unit peralatan kritis, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Nilai-nilai ini diperoleh dari data keandalan historis yang diperoleh dalam studi sebelumnya.

Tabel 1. Nilai Probabilitas Kegagalan Peralatan Kritis

No.	Peralatan	Probabilitas Kegagalan
1.	GT 1.1 <i>Compressor</i>	0,180
2.	ST 1.0 <i>Condenser</i>	0,376
3.	HRSR 1.2 <i>Exhaust Damper</i>	0,368
4.	GT 1.3 <i>Turbine</i>	0,300
5.	ST 1.0 LP <i>Boiler Feed Pump</i>	0,398
6.	GT 1.2 <i>Rotor Cooling Air</i>	0,362
7.	HRSR 1.3 <i>Superheater</i>	0,322

Sumber: Data historis analisis keandalan PT X (2025)

3.2 Tindakan Mitigasi dan Probabilitas *Pivotal Event*

Strategi mitigasi yang dikembangkan disesuaikan dengan setiap mode kegagalan yang telah diidentifikasi berdasarkan data historis kegagalan. Kemungkinan terjadinya program mitigasi ini dievaluasi berdasarkan probabilitas keberhasilan dan kegagalan masing-masing dalam jangka waktu satu tahun operasional. $P(m)$ menunjukkan probabilitas keberhasilan atau dilaksanakannya program mitigasi, sedangkan $P(nm)$ menunjukkan probabilitas kegagalan atau tidak dilaksanakannya program mitigasi tersebut. Probabilitas bersyarat kemudian diklasifikasikan menggunakan skala yang disajikan dalam Tabel 2. Strategi mitigasi dan probabilitas terkait untuk setiap unit peralatan dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 2. Kriteria Probabilitas Dilaksanakannya Program Mitigasi

Parameter	Probabilitas	Deskripsi Kualitatif
Tingkat Probabilitas		
Sangat Tinggi (E)	>0,8 – 1,00	Pasti akan terjadi
Tinggi (D)	>0,6 – 0,8	Kemungkinan besar akan terjadi

Sedang (C)	>0,4 – 0,6	Sama kemungkinan terjadi dan tidak terjadi
Rendah (B)	>0,2 – 0,4	Kurang kemungkinan terjadi
Sangat Rendah (A)	0 – 0,2	Pasti tidak akan terjadi

Sumber: Data Internal Perusahaan, 2022

Tabel 3. Program Mitigasi Atas Kegagalan Peralatan Kritis

No.	Program Mitigasi	P(m)	P(nm)
<i>GT 1.1 Compressor</i>			
1.	Pemasangan sensor <i>close-loop feedback</i> pada <i>Inlet Guide Vane (IGV)</i>	0,9	0,1
2.	Pengecekan <i>mechanical parts</i> (IGV roller blade, IGV spring pin, dan penambahan <i>grease</i>)	0,9	0,1
3.	Inspeksi <i>bleed valve</i>	0,4	0,6
<i>ST 1.0 Condenser</i>			
1.	Injeksi <i>chlorine</i> dan <i>ferrous</i>	0,8	0,2
2.	<i>Monitoring chlorine</i> dan <i>ferrous</i>	0,8	0,2
3.	Inspeksi <i>eddy current</i>	0,4	0,6
<i>HRSG 1.2 Exhaust Damper</i>			
1.	Pengecekan <i>seal</i> pada <i>casing HRSG</i>	0,7	0,3
2.	Penggantian <i>deceleration part</i> secara berkala	0,4	0,6
3.	Penggantian <i>bladder part</i> secara berkala	0,6	0,4
4.	Penggantian <i>solenoid valve</i> pada sistem <i>exhaust damper</i>	0,6	0,4
<i>GT 1.3 Turbine</i>			
1.	Kalibrasi sistem kontrol <i>fuel valve</i>	0,8	0,2
2.	Penggantian <i>filter servo fuel control</i> dan <i>turbine gas nozzle</i>	0,6	0,4
3.	<i>Loop test</i>	0,6	0,4
4.	<i>Online Oil Control Purifier</i>	0,9	0,1
<i>ST 1.0 LP Boiler Feed Pump</i>			
1.	Inspeksi <i>suction line</i> dengan UT <i>thickness assessment</i>	0,4	0,6
2.	<i>Monitoring</i> vibrasi pompa	0,9	0,1
3.	<i>Monitoring</i> aliran pompa dan level <i>oil</i>	0,9	0,1
4.	Pengecekan <i>breaker</i> secara berkala dan kalibrasi <i>valve</i>	0,9	0,1
<i>GT 1.2 Rotor Cooling Air</i>			
1.	Inspeksi <i>rotor cooling air tube</i>	0,6	0,4
2.	Penggantian <i>Spiral Wound Gasket (SWG)</i> secara berkala	0,6	0,4
<i>HRSG 1.3 Superheater</i>			
1.	Pengecekan <i>tube</i> secara berkala	0,6	0,4
2.	<i>Retubing</i> pada <i>tube</i> yang mengalami penipisan	0,6	0,4
3.	Inspeksi <i>gearbox</i> secara berkala	0,6	0,4
4.	Pelumasan <i>gearbox</i> secara berkala	0,9	0,1

Sumber: olah data penelitian

3.3 Pengembangan Skenario Mitigasi

Setelah program mitigasi ditentukan dan probabilitasnya dievaluasi, skenario mitigasi dikembangkan dan divisualisasikan dalam diagram *event tree*. Diagram ini menggambarkan jalur skenario beserta probabilitas dan konsekuensinya. Probabilitas hasil diperoleh dari perhitungan sesuai dengan Persamaan (1), seperti yang ditunjukkan dalam contoh diagram ETA untuk peralatan GT 1.1 *Compressor* pada Gambar 1. Nilai P(nm) digunakan sebagai probabilitas *pivotal event* pada opsi mitigasi *yes* (mitigasi dilaksanakan) karena mewakili potensi kegagalan mitigasi yang dapat meningkatkan tingkat risiko. Dengan cara yang sama, ETA diagram dibangun untuk 6 peralatan kritis lainnya.

Selanjutnya, probabilitas hasil dikonversi menjadi tingkat probabilitas dengan adanya penyesuaian dengan nilai probabilitas *initiating event* pada masing-masing peralatan. Selanjutnya tingkat konsekuensi ditentukan berdasarkan dampak tersisa di jalur mitigasi yang dievaluasi menggunakan kriteria dalam Tabel 4.

Peristiwa Pemicu (<i>Initiating Event</i>)	Pemasangan sensor <i>open-close feedback</i> pada <i>Inlet Guide Vane</i> (IGV)	Pengecekan <i>mechanical parts</i> (IGV <i>roller blade</i> , IGV <i>spring pin</i> , dan <i>greasing</i>)	Inspeksi <i>Bleed Valve</i>	Hasil	
				Probabilitas	Konsekuensi
Kegagalan peralatan GT 1.1 Compressor = 0.18	Yes 0.1	No 0.9	Yes 0.6	0.0011	Tidak Signifikan
			No 0.4	0.0007	Minor
	Yes 0.1	No 0.9	Yes 0.6	0.0097	Minor
			No 0.4	0.0065	Medium
	Yes 0.1	No 0.9	Yes 0.6	0.0097	Minor
			No 0.4	0.0065	Medium
	Yes 0.1	No 0.9	Yes 0.6	0.0875	Sangat Signifikan
			No 0.4	0.0583	Sangat Signifikan

Gambar 1. *Event Tree Diagram* GT 1.1 Compressor

Tabel 4. Kriteria Penilaian Konsekuensi

Kategori	Parameter Risiko	Downtime	Biaya <i>Opportunity Loss</i> di Setiap Peralatan
Tidak Signifikan (1)		Hingga 3 jam	Hingga 3 jam
Minor (2)		3-12 jam	3-12 jam
Medium (3)		12 jam – 1 hari	12 jam – 1 hari
Signifikan (4)		1 hari – 1 minggu	1 hari – 1 minggu
Sangat Signifikan (5)		> 1 minggu	> 1 minggu

Sumber: Data internal perusahaan, 2022

3.4 Analisa Tingkat Risiko

Kombinasi tingkat probabilitas dan konsekuensi digunakan untuk mengidentifikasi tingkat risiko melalui matriks risiko pada Gambar 2. Analisis risiko dilakukan untuk setiap jalur skenario, dan hasil yang merangkum jalur terbaik untuk setiap peralatan, termasuk nilai probabilitas dan konsekuensi, disajikan dalam Tabel 5.

Tingkat Probabilitas	Sangat Tinggi	E	Sedang	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem
	Tinggi	D	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Ekstrem
	Sedang	C	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi
	Rendah	B	Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi

	Sangat Rendah	A	Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi
			1	2	3	4	5
			Tidak Signifikan	<i>Minor</i>	Sedang	Signifikan	Sangat Signifikan
Tingkat Konsekuensi							

Gambar 2. Matriks Risiko
 (Sumber: Data internal perusahaan, 2022)

Tabel 5. Ringkasan Rekomendasi Jalur Skenario Terbaik untuk Tiap Peralatan

No.	Peralatan	Nomor Rekomendasi Jalur Skenario	Jumlah Jalur Skenario	Probabilitas Kegagalan pada Jalur Rekomendasi	Tingkat Probabilitas	Tingkat Konsekuensi	Tingkat Risiko Minimum
1	GT 1.1 Compressor	2	8	0.0007	Sangat Rendah	<i>Minor</i>	Rendah
2	ST 1.0 Condenser	2	8	0.006	Rendah	<i>Minor</i>	Rendah
3	HRSG 1.2 Exhaust Damper	5	16	0.0071	Rendah	<i>Minor</i>	Rendah
4	GT 1.3 Turbine	1	16	0.001	Rendah	Tidak Signifikan	Rendah
5	ST 1.0 LP Boiler Feed Pump	1	16	0.0002	Sangat Rendah	Tidak Signifikan	Rendah
6	GT 1.2 Rotor Cooling Air	1	4	0,0579	Rendah	Tidak Signifikan	Rendah
7	HRSG 1.3 Superheater	1	16	0.002	Rendah	Tidak Signifikan	Rendah

Sumber: olah data penelitian

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ialah penurunan keandalan di Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Blok 1 PT X dengan menerapkan *Event Tree Analysis* (ETA) untuk mengembangkan skenario mitigasi untuk peralatan kritis. Tujuh unit peralatan dengan total *downtime* tertinggi diidentifikasi, dan untuk masing-masing unit, 4 hingga 16 jalur mitigasi dihasilkan tergantung pada jumlah program mitigasi yang direncanakan. Melalui ETA, setiap skenario dinilai berdasarkan kemungkinan kegagalan peralatan dan keberhasilan tindakan mitigasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua skenario yang direkomendasikan dapat mengurangi tingkat risiko secara keseluruhan ke kategori “Rendah”. Namun demikian, masih terdapat beberapa konsekuensi residual pada peralatan GT 1.1 *Compressor*, ST 1.0 *Condenser*, dan HRSG 1.2 *Exhaust Damper*, yang disebabkan oleh keterbatasan dalam menerapkan tindakan mitigasi tertentu dalam periode operasional satu tahun-terutama yang memerlukan inspeksi atau perbaikan besar.

Temuan ini menyoroti pentingnya mengintegrasikan pemeliharaan berbasis risiko dengan perencanaan implementasi yang realistis. Penelitian ini memberikan kontribusi

kerangka kerja praktis untuk memprioritaskan strategi mitigasi dalam operasi pembangkit listrik dan menunjukkan bagaimana ETA dapat mendukung pengambilan keputusan yang lebih terstruktur dan adaptif. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini juga memiliki potensi untuk diterapkan di industri berisiko tinggi lainnya yang menghadapi tantangan operasional serupa.

Daftar Pustaka

- [1] Adriwiyono and B. Ichtiarto, "Analisa Kinerja Pembangkit Turbin Gas PT PJB Unit Pembangkitan Muara Tawar menggunakan Generating Availability Data System," 2018.
- [2] W. N. Cahyo and N. Ardyanto, "Maintenance Management Analysis of Induce Draft Fan (IDF) Equipment of Coal Fire Power Plant (CFPP) Lontar using Life Cycle Cost Analysis Approach," *Spektrum Industri*, vol. 18, no. 2, p. 145, Oct. 2020, doi: 10.12928/si.v18i2.17515.
- [3] B. Wahyudi, H. B. Santoso, and S. Rahayuningsih, "Keandalan Sistem Instrumentasi dengan Metode Markov Chain," *WIT Trans. Inf. Commun. Technol*, vol. 5, no. 2, pp. 1147–1157, 2022, doi: 10.30737/jatiunik.v5i2.2159.g2065.
- [4] M. R. Mamdikar, V. Kumar, P. Singh, and L. Singh, "Reliability and performance analysis of safety-critical system using transformation of UML into state space models," *Ann Nucl Energy*, vol. 146, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.anucene.2020.107628.
- [5] PT PLN (Persero), "Indikator Kinerja Pembangkit," 2007.
- [6] PT X, "Realisasi EAF PT X 2019–2023," 2024.
- [7] D. Choudhary, M. Tripathi, and R. Shankar, "Reliability, Availability and Maintainability Analysis of a Cement Plant: a Case Study," *International Journal of Quality and Reliability Management*, vol. 36, no. 3, pp. 298–313, Mar. 2019, doi: 10.1108/IJQRM-10-2017-0215.
- [8] P. Tsarouhas, "Maintenance Scheduling of a Cheddar Cheese Manufacturing Plant based on RAM Analysis," *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 71, no. 2, pp. 666–690, Jan. 2022, doi: 10.1108/IJPPM-01-2021-0010.
- [9] F. Crawley, "Event Tree Analysis," in *A Guide to Hazard Identification Methods*, Elsevier, 2020, pp. 125–130. doi: 10.1016/b978-0-12-819543-7.00014-8.
- [10] N. Veljanovski and M. Čepin, "Event Tree-based Risk and Financial Assessment for Power Plants," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 247, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.res.2024.110122.
- [11] S. Yuan, J. Cai, G. Reniers, M. Yang, C. Chen, and J. Wu, "Safety Barrier Performance Assessment by Integrating Computational Fluid Dynamics and Evacuation Modeling for Toxic Gas Leakage Scenarios," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 226, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.res.2022.108719.

- [12] M. P. Brito and I. G. J. Dawson, "Predicting the Validity of Expert Judgments in Assessing the Impact of Risk Mitigation Through Failure Prevention and Correction," *Risk Analysis*, vol. 40, no. 10, pp. 1928–1943, Oct. 2020, doi: 10.1111/risa.13539.
- [13] E. Kurniawan, W. Gunawan, and A. Syarifudin, "Analisa Vibrasi Main Sea Water Pump Dengan Metode Overall Equipment Effectiveness Dan Failure Modes And Effect Analysis Di Pt Krakatau Daya Listrik," *JOURNAL INDUSTRIAL ENGINEERING & MANAGEMENT RESEARCH (JIEMAR)*, vol. 1, no. 2, pp. 2722–8878, 2020, doi: 10.7777/jiemar.v1i2.
- [14] I. Q. Saffar and A. W. Ezzat, "Probabilistic Risk Assessment of Typical Process Plant Using Event Tree and Fault Tree Analysis," *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 43, no. 7, pp. 465–477, 2020, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/346955478>
- [15] Z. Zafirovski, V. Gacevski, Z. Krakutovski, and S. Ognjenovic, "Methodology for Tunnel Risk Assessment using Fault and Tree Analysis," 2021, doi: 10.5592/CO/CETRA.2020.
- [16] S. C. Gulen, *Gas Turbine Combined Cycle Power Plants*. Taylor & Francis Group, 2020.
- [17] R. Lesmana, "Analisis Kinerja Unit Pembangkit Akibat Outage Berdasarkan Equivalent Availability Factor dan Net Capacity Factor di PLTA Lamajan Pangalengan," 2023.
- [18] John. Lark and Valentin. Nikonov, *ISO31000 Risk Management: a Practical Guide for SMEs*. International Organization for Standardization : International Trade Centre : UNIDO, 2015.
- [19] C. L. Pritchard, *Risk Management: Concepts and Guidance, Fifth Edition*. 2015.
- [20] J. D. Andrews and T. R. Moss, *Reliability and Risk Assessment*, Second edition. Professional Engineering Publishing, 2002.
- [21] A. Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54209-5.
- [22] R. F. Stapelberg, *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer London, 2009. doi: 10.1007/978-1-84800-175-6.
- [23] V. de Vasconcelos, W. Antonio Soares, A. Carlos Lopes da Costa, and A. Laureano Raso, "Treatment of Uncertainties in Probabilistic Risk Assessment," in *Reliability and Maintenance - An Overview of Cases*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.83541.