

Analisis Faktor Penentu Prioritas Penjadwalan Outage Maintenance Pembangkit Listrik Pada Sistem Terisolasi Menggunakan Metode AHP

Sofwat Sanjaya¹, Mar'atus Sholihah²

^{1,2}) Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111
Email : sovot777@gmail.com, sholihah@ie.its.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pengembangan model prioritas Outage Maintenance pada sistem tenaga listrik terisolasi dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Sistem kelistrikan terisolasi di Indonesia memiliki keterbatasan cadangan daya dan ketergantungan tinggi terhadap pembangkit lokal, sehingga sangat rentan terhadap gangguan operasional. Pendekatan Time-Based Maintenance (TBM) yang umum digunakan memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan kondisi aktual peralatan maupun konsekuensi kegagalan secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis Multi-Criteria Decision Making (MCDM) yang mengintegrasikan berbagai kriteria penting berdasarkan standar ISO 14224. Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur sistematis untuk mengidentifikasi kriteria utama, dilanjutkan dengan penyusunan struktur hierarki AHP yang mencakup kriteria Failure Consequences, Historical Failure & Maintenance Records, serta Resources. Data diperoleh melalui penilaian 10 orang expert dengan metode pairwise comparison. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Failure Consequences menjadi kriteria paling dominan dengan bobot 67,04%, diikuti oleh Historical Failure & Maintenance Records sebesar 21,78% dan Resources sebesar 11,18%. Pada tingkat sub-kriteria, faktor Safety memiliki bobot tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa prioritas Outage Maintenance lebih dipengaruhi oleh risiko keselamatan dan dampak kegagalan dibandingkan faktor sumber daya. Model yang diusulkan mampu memberikan pendekatan yang lebih adaptif, objektif, dan terstruktur dalam pengambilan keputusan pemeliharaan pada sistem tenaga listrik terisolasi.

Kata kunci: *Outage Maintenance*; Sistem Tenaga Listrik Terisolasi; *Analytical Hierarchy Process (AHP)*; *Multi-Criteria Decision Making (MCDM)*; ISO 14224; Prioritisasi Pemeliharaan

ABSTRACT

This study presents the development of an Outage Maintenance prioritization model for isolated power systems using the Analytical Hierarchy Process (AHP). Isolated power systems in Indonesia are characterized by limited reserve margins and high dependence on local power plants, making them highly vulnerable to operational disturbances. The commonly used Time-Based Maintenance (TBM) approach has significant limitations as it does not consider actual equipment conditions or failure consequences comprehensively. Therefore, this research proposes a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) approach that integrates key criteria based on the ISO 14224 standard. The research methodology involves a systematic literature review to identify relevant criteria, followed by the construction of an AHP hierarchical structure consisting of Failure Consequences, Historical Failure & Maintenance Records, and Resources. Data were collected from 10 experts using pairwise comparison. The results indicate that Failure Consequences is the most dominant criterion with a weight of 67.04%, followed by Historical Failure & Maintenance Records at 21.78% and Resources at 11.18%. At the sub-criteria level, Safety has the highest global weight. These findings demonstrate that Outage Maintenance prioritization is primarily influenced by safety risks and failure impacts rather than resource availability. The proposed model provides a more adaptive, structured, and objective decision-making framework for maintenance planning in isolated power systems.

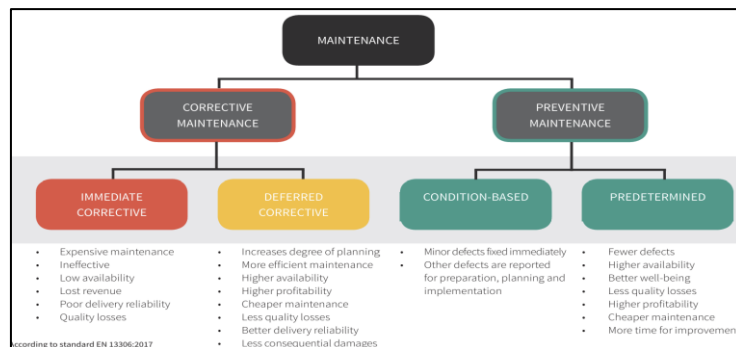
Keywords: *Outage Maintenance*; *Isolated Power System*; *Analytical Hierarchy Process (AHP)*; *Multi-Criteria Decision Making (MCDM)*; ISO 14224; *Maintenance Prioritization*

Pendahuluan

Sistem kelistrikan terisolasi di Indonesia merupakan sistem tenaga listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa interkoneksi kuat dengan sistem grid besar seperti sistem Jawa-Bali. Sistem ini umumnya terdapat pada wilayah kepulauan, seperti Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua, yang memiliki keterbatasan infrastruktur transmisi antar pulau. Karakteristik utama sistem terisolasi adalah margin cadangan daya (*spinning reserve*) yang relatif rendah serta ketergantungan tinggi terhadap keandalan pembangkit lokal [1]. Sebagai contoh, sistem

kelistrikan Bali memiliki cadangan daya hanya sekitar 5-6% dari beban puncak, jauh di bawah standar internasional sebesar 15%, sehingga sangat rentan terhadap gangguan sistem dan potensi *load shedding* [2].

Kondisi ini diperparah oleh keterbatasan pasokan energi primer, seperti gas, serta ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar minyak yang memiliki biaya operasional tinggi. Dengan karakteristik tersebut, sistem kelistrikan terisolasi membutuhkan strategi pengelolaan yang lebih adaptif, khususnya dalam pengambilan keputusan waktu pemeliharaan pembangkit, karena keterlambatan waktu pemeliharaan dan gangguan kecil sekalipun dapat berdampak signifikan terhadap kestabilan sistem. *Outage Maintenance* berbasis waktu yang disebut juga *Time-Based Maintenance (TBM)* merupakan salah satu strategi pemeliharaan preventif tradisional yang paling banyak digunakan dalam industri, termasuk sektor pembangkitan listrik. Pendekatan ini menjadwalkan aktivitas pemeliharaan berdasarkan interval waktu tertentu atau jumlah jam operasi, tanpa mempertimbangkan kondisi aktual dari peralatan. Dalam praktiknya, TBM memiliki beberapa keunggulan, antara lain (i) Mudah diimplementasikan karena berbasis jadwal tetap (ii) Tidak memerlukan teknologi monitoring yang kompleks dan (iii) Sesuai dengan rekomendasi pabrikan peralatan [3] [4]. Di lingkungan pembangkit listrik, TBM umumnya digunakan untuk menentukan jadwal overhaul, inspeksi rutin, dan penggantian komponen Utama [5] [6].



Gambar 1. Jenis pemeliharaan berdasarkan SS-EN 13306

Meskipun sederhana dan mudah diterapkan, berbagai literatur menunjukkan bahwa *Outage Maintenance* berbasis waktu memiliki sejumlah keterbatasan signifikan, terutama dalam sistem yang kompleks dan dinamis seperti (i) tidak mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. Hal ini dapat menyebabkan *over-maintenance* (pemeliharaan terlalu sering) atau *under-maintenance* (pemeliharaan terlambat), yang pada akhirnya berdampak pada inefisiensi biaya dan peningkatan risiko kegagalan [7], (ii) tidak mengakomodasi probabilitas dan konsekuensi kegagalan secara eksplisit, (iii) kurang adaptif terhadap kondisi operasional yang dinamis. Studi menunjukkan bahwa integrasi antara pemeliharaan, produksi, dan sumber daya masih terbatas dalam pendekatan berbasis waktu, sehingga diperlukan model yang lebih komprehensif [8]. Dengan kendala tersebut, dampak dari kelemahan TBM juga akan lebih buruk dalam sistem kelistrikan terisolasi karena (i) Tidak selaras dengan fluktuasi beban sistem, (ii) berpotensi menyebabkan defisit daya saat *Outage* dilakukan pada waktu yang tidak tepat, dan (iii) mengandalkan *judgement* subjektif dalam pengambilan keputusan pemeliharaan [9].

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kebutuhan penelitian yang mendesak untuk mengembangkan model pengambilan keputusan *Outage Maintenance* yang lebih adaptif berbasis multi-kriteria selain *Time-Based* dan bagaimana mengintegrasikan berbagai kriteria tersebut ke dalam suatu model pengambilan keputusan. Untuk mencapai tujuan tersebut, dilakukan evaluasi terhadap penelitian sebelumnya guna membangun landasan yang tepat dalam menentukan elemen-elemen kriteria berkaitan dengan prioritasasi *Outage Maintenance* [10]. Kontribusi dari penelitian ini terletak pada upaya mengintegrasikan pendekatan yang terfragmentasi dari studi sebelumnya dan memastikan penentuan kriteria dalam prioritasasi *Outage Maintenance* menggunakan referensi yang tepat dan bisa dipertanggungjawabkan.

Kesenjangan Penelitian

Kajian literatur sistematis dilakukan untuk mengidentifikasi perkembangan penelitian terkait pengambilan keputusan jadwal, strategi, dan prioritas pemeliharaan dalam sepuluh tahun terakhir. Fokus utama kajian ini adalah pada penelitian yang menggunakan pendekatan MCDM, optimasi, simulasi, *fuzzy decision-making*, dan *data-driven maintenance*.

Berdasarkan Tabel. 1 hasil *Systematic Literature Review* menunjukkan bahwa pengambilan keputusan pemeliharaan dalam satu dekade terakhir didominasi oleh pendekatan multi-kriteria yang mengintegrasikan aspek teknis, operasional, dan manajerial secara simultan. Kriteria *Production & Operation* menjadi elemen paling dominan karena berkaitan langsung dengan kontinuitas sistem dan *availability*. Hal ini terlihat pada penelitian [11] yang mengoptimalkan skenario pemeliharaan melalui kombinasi *reliability*, *availability*, serta *human error* menggunakan pendekatan simulasi dan AHP-TOPSIS. Selain itu, [9] menunjukkan bahwa penggunaan *Artificial Neural Network (ANN)* mampu meningkatkan akurasi prediksi kegagalan dan mendukung perencanaan pemeliharaan berbasis interval yang lebih optimal. Selanjutnya, aspek *Safety* dan *Environmental* menunjukkan

peningkatan signifikan dalam integrasi model pengambilan keputusan. Pemilihan strategi pemeliharaan harus mempertimbangkan keselamatan, biaya, efektivitas, serta dampak lingkungan secara bersamaan [12]. Temuan ini juga diperkuat oleh yang mengembangkan model berbasis AHP-TOPSIS dengan indikator *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), dimana faktor *safety* dan efisiensi operasional menjadi komponen utama dalam menentukan strategi pemeliharaan optimal [13]. Dalam konteks kriteria berbasis kondisi, elemen *Asset Condition*, *Interval Outage*, dan *Trend of Degradation* (CBM) mulai banyak digunakan seiring perkembangan teknologi *data-driven maintenance*. Terdapat penelitian juga yang menunjukkan bahwa integrasi metode AHP, COPRAS, dan *integer programming* mampu mengoptimalkan strategi pemeliharaan dengan mempertimbangkan kondisi aset dan perilaku degradasi sistem secara menyeluruh [14]. Selain itu, terdapat penelitian juga yang menegaskan pentingnya pemilihan metode MCDM yang tepat untuk memprioritaskan *Work Order* pemeliharaan dengan mempertimbangkan karakteristik sistem dan keterbatasan sumber daya [15]. Sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pemilihan *Maintenance Strategy* secara umum, optimasi *Work Order*, atau *maintenance scheduling* pada sistem interkoneksi skala besar. Penelitian terdahulu juga cenderung menggunakan kriteria yang bersifat parsial dan belum terintegrasi secara eksplisit berdasarkan struktur data *reliability* dan *maintenance* pada standar ISO 14224. Selain itu, penelitian terkait prioritasasi *Outage Maintenance* pada sistem tenaga listrik terisolasi masih sangat terbatas, khususnya yang mempertimbangkan secara simultan aspek *failure consequences*, kondisi aset, degradasi peralatan, dan keterbatasan sumber daya. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengembangkan model prioritasasi *Outage Maintenance* berbasis AHP yang mengintegrasikan elemen-elemen ISO 14224 ke dalam kerangka pengambilan keputusan multi-kriteria yang lebih holistik dan adaptif terhadap karakteristik sistem tenaga listrik terisolasi

Tabel 1. Kesenjangan penelitian terkait elemen kriteria yang mempengaruhi prioritasasi *Outage Maintenance*

Literature	Method	Key factors affecting maintenance Outage priority based on ISO 14224									Output
		Safety	Env	Prod & Ops	Asset Cond	Inteval	Degradation (CBM)	Spare Part	Lab or	Tools	
[11]	Simulasi + AHP-TOPSIS	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	-	Prioritization & Scheduling
[15]	MCDM Selection Framework	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	Work Order Prioritization
[16]	AHP-TOPSIS + 4DX	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	✓	Program Prioritization
[12]	Fuzzy AHP-TOPSIS	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	Strategy
[17]	AHP-TOPSIS	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	Strategy
[13]	AHP-TOPSIS + EDAS	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓	✓	Strategy
[18]	MCO Review	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	Framework
[19]	AHP-TOPSIS-PROMETHEE	-	-	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	Strategy
[14]	AHP-COPRAS-IP	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	Strategy
[9]	ANN + AHP-TOPSIS	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	Schedule

Identifikasi Faktor Penting Yang Mempengaruhi Prioritasasi Outage Maintenance Berdasarkan ISO 14224

Menurut *International Standard ISO 14224, maintenance management* berbasis data menekankan pentingnya integrasi antara data kegagalan, data pemeliharaan, dan data operasional untuk mendukung pengambilan keputusan yang objektif. Pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk mengidentifikasi pola kegagalan, mengevaluasi kinerja aset, serta menentukan strategi pemeliharaan yang paling efektif [20]. ISO 14224 juga menekankan bahwa data tersebut digunakan untuk berbagai analisis seperti *reliability*, *availability*, *maintenance planning*, serta aspek *safety* dan *environment* yang menjadi dasar dalam menentukan prioritas pemeliharaan [21]. Berdasarkan prinsip tersebut, elemen-elemen dalam ISO 14224 dapat diturunkan menjadi kriteria pengambilan keputusan prioritas pemeliharaan berbasis multi-kriteria.

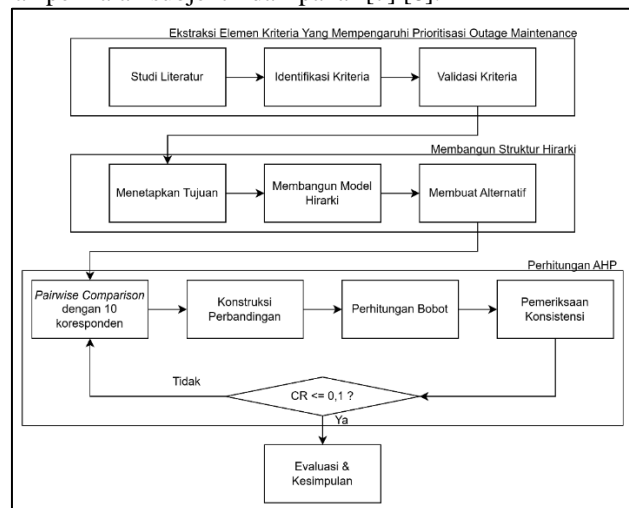
Tabel 2. Faktor Penting Yang Mempengaruhi Prioritisasi Outage Maintenance Berdasarkan ISO 14224

Criteria	Sub-Criteria	ISO 14224
Failure Consequences	Safety	Table C.2 Safety consequences (loss of life, injury, safety-critical failure)
	Environmental	Tabel C.2 Environmental consequences (major-minor pollution)
	Production & Operation	Tabel C.2 Production + operational impacts (production stops, maintenance cost increase)
Historical Failure & Maintenance Records	Asset Condition	Table B.2 - Failure mechanism (Incipient & degraded failure definitions)
	Interval Outage	Table 8 Maintenance data - chapter 9.6.3.3 Preventive maintenance programme
	Trend of Degradation-Main Equipment (CBM)	(Table B.4 - Detection method) Degraded, critical progression
Resources	Spare Part Availability	Table 8 Maintenance data - chapter 9.6.3.3 Preventive maintenance programme
	Labor Availability	Table 8 Maintenance data - chapter 9.6.3.3 Preventive maintenance programme
	Tools & Equipment Availability	Table 8 Maintenance data - chapter 9.6.3.3 Preventive maintenance programme

Kriteria ini berkaitan langsung dengan parameter seperti *downtime*, *maintenance time*, dan *repair time* dalam ISO 14224 yang mempengaruhi performa *availability* sistem serta efektivitas implementasi strategi pemeliharaan [22]. Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan penelitian yang telah diidentifikasi, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pengambilan keputusan prioritas *Outage Maintenance* pada sistem tenaga listrik terisolasi yang tidak hanya mampu menentukan bobot kepentingan setiap kriteria, tetapi juga menghasilkan rekomendasi keputusan yang bersifat operasional dan aplikatif. Secara spesifik, tujuan penelitian ini adalah (i) Mengidentifikasi dan menyusun kriteria serta sub-kriteria prioritas *Outage Maintenance* berdasarkan standar ISO 14224, (ii) Mengembangkan model berbasis AHP untuk menentukan bobot kepentingan setiap kriteria secara sistematis dan terstruktur, (iii) Mengintegrasikan hasil pembobotan ke dalam kerangka pengambilan keputusan yang dapat digunakan untuk menentukan prioritas *Outage Maintenance* secara lebih objektif, dan (iv) Menyediakan dasar pengembangan *Decision Support System* (DSS) dalam perencanaan *Outage Maintenance* yang mempertimbangkan risiko kegagalan, kondisi aset, dan keterbatasan sumber daya. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada aspek metodologis dalam pengembangan model MCDM, tetapi juga memberikan kontribusi praktis dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih adaptif, berbasis risiko, dan sesuai dengan karakteristik sistem tenaga listrik terisolasi.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis MCDM dengan menggunakan metode AHP. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengakomodasi berbagai kriteria yang bersifat kompleks, saling bertentangan, dan melibatkan penilaian subjektif dari pakar [7] [8].



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

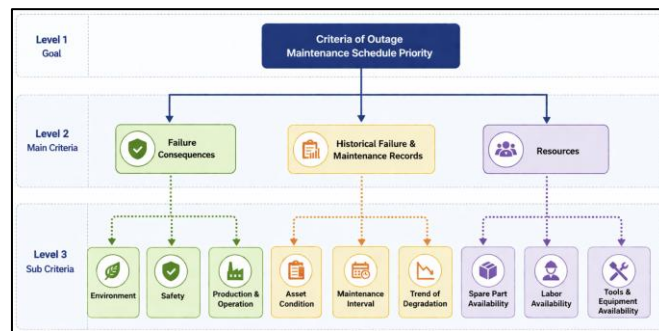
Penelitian ini memiliki dua kontribusi utama, yaitu kontribusi metodologis dan kontribusi praktis. Dari sisi metodologis, penelitian ini mengembangkan integrasi elemen *reliability and maintenance* data berdasarkan standar ISO 14224 ke dalam struktur AHP untuk menentukan prioritas *Outage Maintenance* pada sistem tenaga listrik terisolasi. Integrasi ini menghasilkan kerangka MCDM yang lebih sistematis dibandingkan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan kriteria teknis atau operasional secara parsial. Dari sisi praktis, model yang diusulkan mampu memberikan dasar pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih objektif dengan mempertimbangkan *failure consequences*, *historical maintenance records*, dan *resource availability* secara simultan. Model ini juga dapat menjadi fondasi pengembangan DSS dalam perencanaan *Outage Maintenance* berbasis risiko pada sistem pembangkitan terisolasi.

Metode AHP

AHP merupakan metode pengambilan keputusan multikriteria yang digunakan untuk menangani permasalahan kompleks dengan banyak kriteria yang saling bertentangan melalui pendekatan struktur hierarki. Metode ini menguraikan masalah ke dalam beberapa tingkat yang terdiri dari tujuan, kriteria, sub-kriteria, dan alternatif sehingga mempermudah proses analisis dan evaluasi keputusan. Pendekatan ini merupakan bagian dari perkembangan *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) yang banyak digunakan dalam bidang energi, *supply chain*, dan *sustainability* untuk mendukung pengambilan keputusan yang kompleks [19] [20] [25].

Penyusunan Hirarki Kriteria Menggunakan AHP

Secara umum, tahapan penggunaan metode AHP terdiri dari beberapa langkah utama. Tahap pertama adalah menyusun struktur hierarki yang mencerminkan tujuan, kriteria, sub-kriteria, dan alternatif keputusan seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2 perihal struktur kriteria dalam menentuka prioritas *Outage Maintenance* berdasarkan ISO 14224.



Gambar 3. Struktur hirarki elemen kriteria prioritas Outage Maintenance

Hasil Dan Pembahasan

Metode AHP digunakan untuk menentukan bobot setiap kriteria dan sub-kriteria, yang meliputi *Failure Consequences* (*Safety*, *Environmental*, *Production & Operation*), *Historical Failure & Maintenance Records* (*Asset Condition*, *Maintenance Interval*, *Trend of Degradation*), serta *Resources* (*Spare Part Availability*, *Labor Availability*, *Tools & Equipment Availability*). Penentuan jumlah *expert* dalam penelitian ini mengacu pada pendekatan *expert sampling* yang umum digunakan dalam penelitian AHP [23]. Dengan melibatkan 10 orang *expert* sebagai responden yang kriteria penilainya adalah sebagai berikut :

- Pendidikan Sarjana
- Memiliki pengalaman kerja di bidang pengelolaan pembangkit listrik ≥ 10 tahun
- Sedang menduduki atau pernah menduduki jabatan minimal sebagai *Assistant Manager* dibidang Operasi, Pemeliharaan, Enjinir, Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan,
- Memiliki peran dalam perencanaan, pengendalian, atau eksekusi pemeliharaan
- Bersedia mengisi kuisisioner secara objektif

Untuk memastikan reliabilitas penilaian, dilakukan pengujian *Consistency Ratio* (CR) pada setiap matriks *pairwise comparison*. Berdasarkan metode Saaty, nilai $CR \leq 0,1$ menunjukkan bahwa penilaian *expert* bersifat konsisten dan dapat diterima. Hasil penelitian menunjukkan seluruh matriks memiliki nilai CR di bawah 0,1 sehingga seluruh *judgment expert* dinyatakan valid dan reliabel untuk digunakan dalam proses pembobotan . Kemudian dilakukan *pairwise comparison* dari seluruh kriteria dengan data hasil responden sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil survey responden Expert

Expert	FC/HF MR	FC/ R	R/HF MR	S/E	S/P O	E/P O	AC/ MI	AC/T oD	MI/To D	SPA/ LA	SPA/T EA	LA/T EA
A	4	6	2	3	5	2	3	4	2	3	4	2
B	3	5	2	3	5	2	3	4	2	3	4	2
C	3	7	3	3	5	2	4	5	2	4	5	2
D	3	5	2	2	4	1	3	4	2	3	4	2
E	4	5	2	3	5	2	3	4	2	3	4	2
F	3	4	2	2	4	1	3	5	2	3	4	2
G	3	5	2	2	3	1	3	4	2	3	4	2
H	5	7	3	5	9	3	3	4	2	3	4	2
I	3	5	2	2	3	1	3	4	2	3	4	2
J	4	6	2	3	5	2	4	5	2	4	5	2
GEOM EAN	3,44	5,42	2,17	2,6 8	4,58	1,58	3,18	4,28	2,00	3,18	4,18	2,00

Berdasarkan hasil pengolahan data, bobot kriteria utama menunjukkan bahwa *Failure Consequences* menjadi faktor paling dominan dengan bobot 0,6704 atau 67,04%. Selanjutnya, *Historical Failure & Maintenance Records* memiliki bobot 0,2178 atau 21,78%, sedangkan *Resources* memiliki bobot 0,1118 atau 11,18%. Komposisi ini menunjukkan bahwa keputusan prioritas *Outage* lebih banyak dipengaruhi oleh besarnya konsekuensi kegagalan dibandingkan hanya oleh kesiapan sumber daya. Dari sisi konsistensi penilaian *expert*, seluruh matriks AHP memenuhi batas konsistensi karena nilai CR berada di bawah 0,1. Nilai CR untuk matriks *Main Criteria* seperti *Failure Consequences* adalah 0,0149, *Historical Failure & Maintenance Records* 0,0008, dan *Resources* 0,0215. Dengan demikian, seluruh judgment expert dinyatakan konsisten dan dapat digunakan sebagai dasar pembobotan.

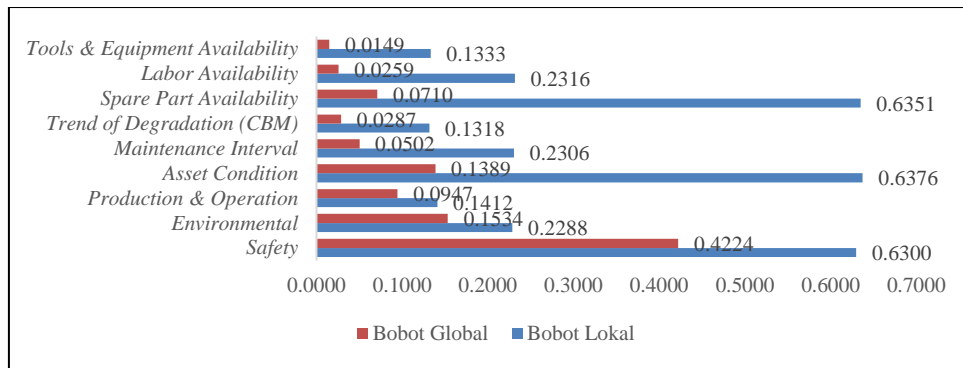
Tabel 4. Pembobotan Kriteria Utama

Main Criteria	Weight	Consistency Ratio
Failure Consequences	0,6704	0,0149
Historical Failure & Maintenance Records	0,2178	0,0008
Resources	0,1118	0,0215

Pada tingkat sub-kriteria, bobot global terbesar adalah *Safety* sebesar 0,4224 atau 42,24%, diikuti oleh *Environmental* sebesar 0,1534 atau 15,34%, *Asset Condition* sebesar 0,1389 atau 13,89%, dan *Production & Operation* sebesar 0,0947 atau 9,47%. Sub-kriteria lainnya memiliki bobot global lebih rendah, yaitu *Spare Part Availability* 7,10%, *Interval Outage* 5,02%, *Trend of Degradation (CBM)* 2,87%, *Labor Availability* 2,59%, dan *Tools & Equipment Availability* 1,49%. Hasil ini menunjukkan bahwa dimensi risiko keselamatan dan dampak kegagalan menjadi faktor paling kritis dalam menentukan prioritas *Outage Maintenance*, sedangkan faktor sumber daya berperan sebagai faktor kelayakan eksekusi.

Tabel 5. Perbandingan Bobot Lokal dan Bobot Global

Sub Kriteria	Bobot Lokal	Bobot Global	Kriteria Utama
<i>Safety</i>	0,6300	0,4224	<i>Failure Consequences</i>
<i>Environmental</i>	0,2288	0,1534	<i>Failure Consequences</i>
<i>Production & Operation</i>	0,1412	0,0947	<i>Failure Consequences</i>
<i>Asset Condition</i>	0,6376	0,1389	<i>Historical Failure & Maintenance Records</i>
<i>Maintenance Interval</i>	0,2306	0,0502	<i>Historical Failure & Maintenance Records</i>
<i>Trend of Degradation (CBM)</i>	0,1318	0,0287	<i>Historical Failure & Maintenance Records</i>
<i>Spare Part Availability</i>	0,6351	0,0710	<i>Resources</i>
<i>Labor Availability</i>	0,2316	0,0259	<i>Resources</i>
<i>Tools & Equipment Availability</i>	0,1333	0,0149	<i>Resources</i>



Gambar 4. Grafik Perbandingan Bobot Global & Bobot Lokal Antar Kriteria

Contoh Kasus Pengambilan Alternatif Keputusan

Untuk menunjukkan implementasi praktis dari model AHP yang telah dikembangkan, dilakukan studi kasus pada sistem pembangkitan listrik terisolasi dengan tiga alternatif unit pembangkit yang akan dijadwalkan *Outage Maintenance*. Studi kasus ini bertujuan untuk mengaplikasikan bobot global yang telah diperoleh ke dalam proses pengambilan keputusan prioritas *Outage* secara operasional. Alternatif yang dianalisis dalam penelitian ini adalah PLTD Unit 1, PLTD Unit 2, dan PLTD Unit 3 dengan tipe pembangkit, lokasi dan peran yang sama dalam sistem ketenagalistrikan di pulau tersebut. Namun, ketiga unit tersebut memiliki karakteristik operasional, tingkat risiko, dan kondisi aset yang berbeda, sehingga memerlukan pendekatan prioritas yang objektif.

Penilaian terhadap masing-masing alternatif dilakukan berdasarkan sub-kriteria yang telah ditentukan, yaitu *Safety*, *Environmental*, *Production & Operation*, *Asset Condition*, *Maintenance Interval*, *Trend of Degradation (CBM)*, *Spare Part Availability*, *Labor Availability*, dan *Tools & Equipment Availability*. Penilaian menggunakan skala 1–9 berdasarkan hasil penilaian dan analisa *expert* yang berhubungan dengan seluruh sub-kriteria.

Tabel 6. Skala penilaian

Intensitas Kepentingan	Definisi	Penjelasan
1	Sama penting	Dua faktor berkontribusi secara sama terhadap tujuan.
3	Sedikit lebih penting	Pengalaman dan pertimbangan sedikit lebih memihak satu faktor dibandingkan yang lain.
5	Lebih penting	Pengalaman dan pertimbangan secara kuat memihak satu faktor dibandingkan yang lain.
7	Sangat lebih penting	Pengalaman dan pertimbangan sangat kuat memihak satu faktor dibandingkan yang lain. Kepentingannya terbukti dalam praktik.
9	Mutlak lebih penting	Bukti yang mendukung satu faktor dibandingkan yang lain memiliki tingkat validitas tertinggi.
2, 4, 6, 8	Nilai antara	Digunakan ketika diperlukan kompromi antara dua tingkat kepentingan.

Tabel 7. Nilai perbandingan dari penilaian Expert

Sub-Kriteria	PLTD 1	PLTD 2	PLTD 3
<i>Safety</i>	8	6	7
<i>Environmental</i>	6	5	8
<i>Production & Operation</i>	7	9	6
<i>Asset Condition</i>	6	9	7
<i>Maintenance Interval</i>	5	8	6
<i>Trend of Degradation</i>	4	8	5
<i>Spare Part Availability</i>	7	6	8
<i>Labor Availability</i>	6	5	7
<i>Tools & Equipment Availability</i>	6	5	7

Nilai pada Tabel 6 dinormalisasi ke skala 0–1 dengan membagi setiap nilai dengan nilai maksimum skala penilaian.

Tabel 8. Normalisasi nilai alternatif

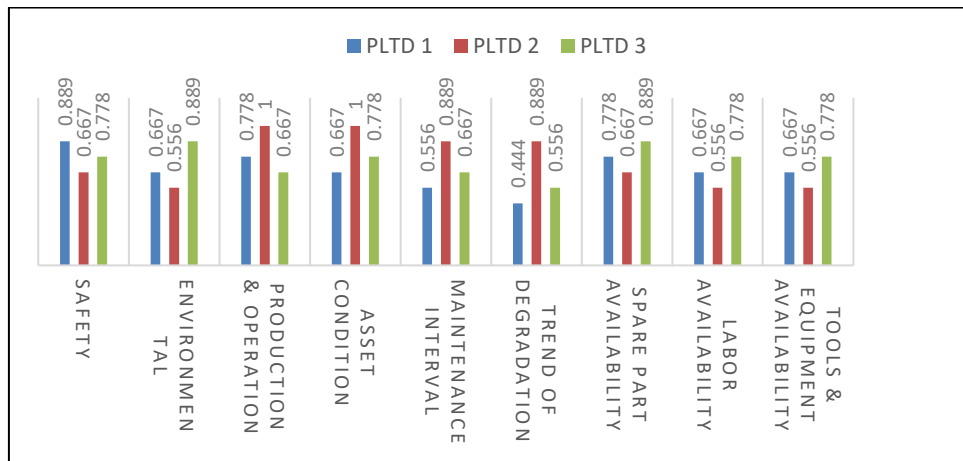
Sub-Kriteria	PLTD 1	PLTD 2	PLTD 3
<i>Safety</i>	0,889	0,667	0,778
<i>Environmental</i>	0,667	0,556	0,889
<i>Production & Operation</i>	0,778	1,000	0,667

<i>Asset Condition</i>	0,667	1,000	0,778
<i>Maintenance Interval</i>	0,556	0,889	0,667
<i>Trend of Degradation</i>	0,444	0,889	0,556
<i>Spare Part Availability</i>	0,778	0,667	0,889
<i>Labor Availability</i>	0,667	0,556	0,778
<i>Tools & Equipment Availability</i>	0,667	0,556	0,778

Kemudian nilai pada Tabel 7 dikalikan dengan bobot kriteria pada Table 5, sehingga diperoleh total nilai pembobotan antar kriteria untuk melihat ranking dari prioritas pemeliharaan.

Tabel 9. Total skor parsial tiap alternatif

Sub-Kriteria	Bobot Global	PLTD 1	Total	PLTD 2	Total	PLTD 3	Total
<i>Safety</i>	0,422	0,889	0,375	0,667	0,282	0,778	0,329
<i>Environmental</i>	0,153	0,667	0,102	0,556	0,085	0,889	0,136
<i>Production & Operation</i>	0,095	0,778	0,074	1,000	0,095	0,667	0,063
<i>Asset Condition</i>	0,139	0,667	0,093	1,000	0,139	0,778	0,108
<i>Maintenance Interval</i>	0,050	0,556	0,028	0,889	0,045	0,667	0,034
<i>Trend of Degradation</i>	0,029	0,444	0,013	0,889	0,026	0,556	0,016
<i>Spare Part Availability</i>	0,071	0,778	0,055	0,667	0,047	0,889	0,063
<i>Labor Availability</i>	0,026	0,667	0,017	0,556	0,014	0,778	0,020
<i>Tools & Equipment Availability</i>	0,015	0,667	0,010	0,556	0,008	0,778	0,012
Total Skor	1,000		0,767		0,740		0,781



Gambar 5. Grafik perbandingan total skor parsial tiap alternatif

Pada tahap akhir, untuk memudahkan interpretasi, total skor pada Tabel 8 dibagi dengan skor maksimum.

Tabel 10. Normalisasi total skor

Alternatif	Skor Mentah	Skor Normalisasi	Ranking
PLTD Unit 3	0,781	1,000	1
PLTD Unit 1	0,767	0,982	2
PLTD Unit 2	0,741	0,949	3

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa PLTD Unit 3 memiliki skor prioritas tertinggi, sehingga direkomendasikan sebagai prioritas utama untuk pelaksanaan *Outage Maintenance*. Hal ini disebabkan oleh kombinasi nilai tinggi pada sub-kriteria kritis seperti *Production & Operation*, *Asset Condition*, serta *Trend of Degradation*. Meskipun PLTD Unit 1 memiliki nilai *Safety* yang tinggi, secara keseluruhan kontribusi dari sub-kriteria lain menyebabkan posisinya berada di bawah PLTD Unit 3. Sementara itu, Unit C memiliki performa yang relatif lebih baik dalam aspek *resource*, namun memiliki nilai lebih rendah pada aspek risiko kegagalan. Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan prioritas *Outage Maintenance* tidak hanya ditentukan oleh satu faktor dominan, tetapi merupakan hasil integrasi multi-kriteria yang mencerminkan kondisi sistem secara menyeluruh.

Analisa Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas hasil prioritas terhadap perubahan bobot kriteria utama. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi perubahan bobot *Failure Consequences* sebesar $\pm 10\%$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTD Unit 3 tetap berada pada ranking pertama meskipun terjadi perubahan bobot moderat pada kriteria dominan. Hal ini menunjukkan bahwa model prioritas yang dikembangkan memiliki tingkat *robustness* yang cukup baik terhadap perubahan preferensi pengambil keputusan. Namun demikian, apabila bobot *Production & Operation* meningkat secara signifikan, maka ranking PLTD Unit 2 cenderung meningkat karena unit tersebut memiliki skor tertinggi pada aspek produksi dan operasi. Temuan ini menunjukkan adanya *trade-off* antara aspek keselamatan dan kontinuitas operasi dalam pengambilan keputusan *Outage Maintenance*.

Tabel 11. Tabel perubahan peringkat analisa sensitivitas

Skenario	Failure Consequences	PLTD 1	PLTD 2	PLTD 3	Ranking
Existing	67.04%	0.767	0.740	0.781	3 > 1 > 2
-10%	60.34%	0.752	0.751	0.772	3 > 1 > 2
10%	73.74%	0.775	0.731	0.788	3 > 1 > 2

Hasil penelitian menunjukkan adanya *trade-off* yang cukup signifikan antara aspek *Safety, Production & Operation*, dan *Resources* dalam menentukan prioritas *Outage Maintenance*. Unit pembangkit dengan tingkat risiko keselamatan tinggi belum tentu memiliki performa terbaik pada aspek operasional maupun kesiapan sumber daya. Sebagai contoh, PLTD Unit 1 memiliki skor *Safety* yang tinggi, namun tidak memiliki nilai terbaik pada *Production & Operation*. Sebaliknya, PLTD Unit 2 memiliki performa operasional yang baik, tetapi memperoleh skor lebih rendah pada aspek keselamatan dan lingkungan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengambilan keputusan *Outage* pada sistem terisolasi tidak dapat hanya berorientasi pada kontinuitas produksi listrik, tetapi juga harus mempertimbangkan konsekuensi kegagalan dan risiko keselamatan secara simultan. Oleh karena itu, pendekatan MCDM menjadi penting untuk menyeimbangkan berbagai kepentingan yang saling bertentangan dalam sistem pembangkitan.

Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model prioritas *Outage Maintenance* berbasis metode AHP yang mengintegrasikan berbagai kriteria penting sesuai standar ISO 14224. Model yang dibangun mencakup tiga kriteria utama, yaitu *Failure Consequences, Historical Failure & Maintenance Records*, dan *Resources*, yang masing-masing merepresentasikan aspek risiko kegagalan, kondisi aset, dan kesiapan sumber daya dalam sistem tenaga listrik terisolasi. Hasil pembobotan menunjukkan bahwa kriteria *Failure Consequences* memiliki pengaruh paling dominan dengan bobot sebesar 0,6704 (67,04%), diikuti oleh *Historical Failure & Maintenance Records* sebesar 0,2178 (21,78%), dan *Resources* sebesar 0,1118 (11,18%). Pada tingkat sub-kriteria, aspek *Safety* menjadi faktor paling kritis dengan bobot global tertinggi sebesar 0,4224 (42,24%), yang menegaskan bahwa pertimbangan keselamatan dan dampak kegagalan merupakan faktor utama dalam menentukan prioritas *Outage Maintenance*. Temuan ini memiliki implikasi manajerial penting, yaitu perusahaan pembangkit perlu mengadopsi pendekatan *Risk-Based Maintenance* dalam menentukan prioritas *Outage*. Dalam praktiknya, unit pembangkit dengan potensi konsekuensi keselamatan tinggi sebaiknya memperoleh prioritas pemeliharaan lebih awal meskipun kondisi sumber daya terbatas. Validitas model diperkuat melalui uji konsistensi AHP yang menunjukkan seluruh nilai *Consistency Ratio* (CR) berada di bawah batas toleransi 0,1, yaitu 0,0149 pada *Failure Consequences*, 0,0008 pada *Historical Failure & Maintenance Records*, dan 0,0215 pada *Resources*. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian *expert* yang digunakan dalam penelitian ini konsisten dan dapat diandalkan sebagai dasar pengambilan keputusan.

Sebagai bentuk implementasi praktis, model diuji melalui studi kasus pada tiga alternatif unit pembangkit (PLTD Unit 1, PLTD Unit 2, dan PLTD Unit 3). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa PLTD Unit 3 memiliki skor prioritas tertinggi, sehingga direkomendasikan sebagai prioritas utama untuk pelaksanaan *Outage Maintenance*. Hal ini disebabkan oleh kombinasi nilai yang unggul pada beberapa sub-kriteria penting, khususnya pada aspek *safety, environmental*, serta ketersediaan sumber daya. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis MCDM mampu mengatasi keterbatasan metode TBM yang cenderung tidak adaptif terhadap kondisi sistem yang dinamis. Model yang diusulkan tidak hanya memberikan hasil pembobotan kriteria, tetapi juga mampu menghasilkan keputusan prioritas yang bersifat operasional dan aplikatif.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi kriteria berbasis ISO 14224 ke dalam kerangka AHP yang terstruktur, serta penerapannya dalam konteks sistem tenaga listrik terisolasi. Model ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan sistem pendukung keputusan dalam perencanaan *Outage Maintenance* yang lebih berbasis risiko dan data. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian ini dapat diperluas dengan mengintegrasikan data *real-time*, teknologi *condition monitoring*, serta metode berbasis kecerdasan buatan guna meningkatkan akurasi dan adaptabilitas model dalam lingkungan operasional yang lebih kompleks. Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Pertama, penelitian menggunakan pendekatan studi pada sistem pembangkitan terisolasi tertentu sehingga

generalisasi hasil ke seluruh sistem kelistrikan Indonesia masih terbatas. Kedua, data penilaian alternatif masih menggunakan asumsi kondisi operasional statis dan belum mempertimbangkan perubahan *real-time* seperti fluktuasi beban, gangguan sistem, maupun perubahan *availability* unit pembangkit. Ketiga, model AHP yang digunakan masih berbasis *expert judgment* sehingga terdapat potensi subjektivitas dalam proses *pairwise comparison* meskipun seluruh matriks telah memenuhi batas konsistensi. Keempat, penelitian ini belum mengintegrasikan data *condition monitoring* berbasis sensor maupun pendekatan *machine learning* yang dapat meningkatkan akurasi prediksi degradasi aset secara dinamis.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan *model hybrid* berbasis *real-time monitoring*, *probabilistic risk assessment*, dan *artificial intelligence* guna meningkatkan *robustness* dan adaptabilitas model pengambilan keputusan *Outage Maintenance*.

Daftar Pustaka

- [1] D. J. Ketengalistrikan, K. Energi, D. A. N. Sumber, D. Mineral, and R. Indonesia, "Statistik 2024," no. 38, 2025.
- [2] Reliability and Security Technical Committee, "Reliability Guideline Operating Reserve Management: Version 3," pp. 1–24, 2021, [Online]. Available: https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/Reliability_Guideline_Template_Operating_Reserve_Management_Version_3.pdf
- [3] R. K. Mobley, *Maintenance Fundamentals*. 2004.
- [4] Wartsila, "Engine Operation and Maintenance Manual (O&MM)," pp. 1–658, 2014, [Online]. Available: www.wartsila.com
- [5] G. Kabir, R. Sadiq, and S. Tesfamariam, "A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 10, no. 9, pp. 1176–1210, 2014, doi: 10.1080/15732479.2013.795978.
- [6] E. Committee, *IEEE Standard Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity*, vol. 2006, no. March. 2007.
- [7] H. Moradi and S. Shadrokh, "A robust reliability-based scheduling for the maintenance activities during planned shutdown under uncertainty of activity duration," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 130, 2019, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106562.
- [8] M. Geurtsen, J. B. H. C. Didden, J. Adan, Z. Atan, and I. Adan, "Production, maintenance and resource scheduling: A review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 305, no. 2, pp. 501–529, 2023, doi: 10.1016/j.ejor.2022.03.045.
- [9] E. Özcan, T. Danişan, R. Yumuşak, and T. Eren, "An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants [Planowanie utrzymania ruchu w elektrowniach wodnych w oparciu o model sztucznej sieci neuronowej wsparty wi]," *Eksploat. i Niezawodn.*, vol. 22, no. 3, pp. 400–418, 2020, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091887440&doi=10.17531%2Fuin.2020.3.3&partnerID=40&md5=ebbc0edab173f165560f32b1469f8c74>
- [10] H. Seiti and A. Hafezalkotob, "Developing the R-TOPSIS methodology for risk-based preventive maintenance planning: A case study in rolling mill company," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 128, no. January, pp. 622–636, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.01.012.
- [11] A. Azadeh, V. Salehi, M. Jokar, and A. Asgari, "An Integrated Multi-Criteria Computer Simulation-AHP-TOPSIS Approach for Optimum Maintenance Planning by Incorporating Operator Error and Learning Effects," *Intell. Ind. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–53, 2016, doi: 10.1007/s40903-016-0039-8.
- [12] G. Ayalew and G. Ayalew, "Integrating Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Models for Construction Equipment Maintenance Strategy Selection," *Int. J. Manag. Fuzzy Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 33–61, 2025, doi: 10.11648/j.ijmfs.20251102.11.
- [13] C. N. Wang, M. H. Hsueh, D. O. Tran Thi, T. D. M. Le, and Q. T. Dinh, "Optimal Maintenance Strategy Selection for Oil and Gas Industry Equipment Using a Combined Analytical Hierarchy Process–Technique for Order of Preference by Similarity to an Ideal Solution: A Case Study in the Oil and Gas Industry," *Processes*, vol. 13, no. 5, 2025, doi: 10.3390/pr13051389.
- [14] E. ÖZCAN, Ş. GÜR, and T. EREN, "A Hybrid Model to Optimize the Maintenance Policies in the Hydroelectric Power Plants," *Politek. Derg.*, vol. 24, no. 1, pp. 75–86, 2021, doi: 10.2339/politeknik.626171.
- [15] R. Favara *et al.*, "Power Plants," no. Mcdm, 2021.
- [16] K. E. Mahardika and M. I. Irawan, "Hybrid AHP Topsis Method for Selection and the Four Disciplines of Execution (4DX) for Monitoring the Animal Disturbance Reduction Program (Case Study: PLN UP3 East Bali)," *Syntax Lit. ; J. Ilm. Indones.*, vol. 10, no. 4, pp. 4374–4392, 2025, doi: 10.36418/syntax-

- literate.v10i4.58615.
- [17] M. Dachyar, R. Nurcahyo, and Y. Tohir, "Maintenance strategy selection for steam power plant in range of capacity 300 - 625 MW in Indonesia," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, pp. 2571–2580, 2018.
 - [18] C. S. Syan and G. Ramsoobag, "Maintenance applications of multi-criteria optimization : A review," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 190, no. November 2018, p. 106520, 2019, doi: 10.1016/j.res.2019.106520.
 - [19] E. Özcan, R. Yumuşak, and T. Eren, "A novel approach to optimize the maintenance strategies: A case in the hydroelectric power plant," *Eksplor. i Niezawodn.*, vol. 23, no. 2, pp. 324–337, 2021, doi: 10.17531/EIN.2021.2.12.
 - [20] M. Andersson, "Maintenance manual 1".
 - [21] International Standard, "ISO 14224 : Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment from IHS COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT," vol. 2016, 2016, [Online]. Available: www.iso.org
 - [22] S. K. Pathak, V. Sharma, S. S. Chougule, and V. Goel, "Prioritization of barriers to the development of renewable energy technologies in India using integrated Modified Delphi and AHP method," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 50, no. May 2021, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101818.
 - [23] Saaty and Wharton, "A Scaling Method for Priorities in Hierarchial Structures," vol. 281, pp. 234–281, 1977.
 - [24] T.-Y. L. and C.-L. H. Young-Jou Lai, "Theory and Methodology TOPSIS for M O D M," vol. 76, pp. 486–500, 1994.
 - [25] A. Abdi, F. R. Astaraei, and N. Rajabi, "GIS-AHP-GAMS based analysis of wind and solar energy integration for addressing energy shortage in industries: A case study," *Renew. Energy*, vol. 225, no. February, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120295.