

Model Optimasi Konsolidasi Hot Dan Cold Maintenance Untuk Peningkatan Keandalan Operasional Pltmg Ambon Peaker Pada Sistem Kelistrikan Terisolasi

Arnold Arung^{1✉}, Mokh Suef²

Magister Teknik Industri pada Institut Teknologi Sepuluh Nopember^{1,2}

Email Korespodensi: arungraitei@gmail.com ✉

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted 06-05-2026

Received 26-05-2026

Published 27-05-2026

Keywords:

Gas Engine Power Plant, Hot Maintenance, Cold Maintenance, Maintenance Consolidation, Outage Window, Optimization Model, EAF, FOR, MTBF, MTTR.

ABSTRACT

The Ambon Peaker Gas Engine Power Plant, with an installed capacity of 39.12 MW, plays a critical role in maintaining the reliability of the Maluku power system, which operates as an isolated system. As a peaker plant, the unit is required to maintain high operational readiness in responding to load fluctuations and system disturbances. However, frequent start-stop operation accelerates component degradation, increases maintenance requirements, and raises the risk of equipment failure if maintenance activities are not properly structured. Maintenance activities in gas engine power plants are generally carried out through Hot Maintenance and Cold Maintenance. Hot Maintenance minimizes operational disruption but is limited in terms of component accessibility, inspection depth, and occupational safety. In contrast, Cold Maintenance enables more comprehensive inspection and repair but requires unit shutdown and affects plant availability during the outage period. This research applies a descriptive-analytical case study approach through maintenance activity identification, classification based on operating conditions and outage requirements, model parameter development, consolidation scoring, scenario analysis, and expert validation through Focus Group Discussion (FGD). The proposed model classifies maintenance activities into Hot Maintenance, Cold Maintenance, Consolidated Planned Outage, and FGD Review. The results show that the proposed consolidation optimization model reduces cold outage frequency from 18 events to 3 events per year. Total outage duration decreases from 198 hours to 162.36 hours. The total cost of the consolidation model is estimated at IDR 1,353.6 million, resulting in cost savings of IDR 1,425.4 million or 51.3% compared with the baseline condition. In terms of reliability, the model improves EAF from 81.50% to 82.48%, reduces FOR from 8.50% to 6.70%, increases MTBF from 840 hours to 926.5 hours, and reduces MTTR from 22 hours to 19.74 hours. The contribution of this study is an applicable maintenance consolidation optimization model for peaker power plants operating in isolated power systems. The model can support structured maintenance work packaging, reduce repetitive maintenance activities, optimize resource utilization, improve planned outage effectiveness, and strengthen maintenance planning for the Ambon Peaker Gas Engine Power Plant.

PENDAHULUAN

Bagian Sistem kelistrikan terisolasi (*isolated system*) memiliki karakteristik yang sangat rentan terhadap fluktuasi beban dan gangguan karena keterbatasan cadangan daya (*reserve margin*). Dalam struktur sistem seperti ini, setiap unit pembangkit memiliki peran krusial dalam menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan. PLTMG Ambon Peaker, sebagai salah satu penyangga utama dalam sistem kelistrikan Ambon, dituntut untuk memiliki tingkat kesiapan unit yang tinggi guna menjamin keandalan operasional secara kontinu (Marsudi, 2016). Namun, pada praktiknya, menjaga keseimbangan antara kebutuhan pemeliharaan mesin dan kecukupan daya sistem merupakan tantangan yang sangat kompleks.

Tabel 1. Data Operasional PLTMG Ambon Peaker 2022–2025

Parameter	2022	2023	2024	2025	Interpretasi
EAF (%)	78,50	79,20	80,80	81,50	Meningkat, tetapi masih memiliki ruang perbaikan
FOR (%)	11,80	10,50	9,20	8,50	Menurun, tetapi forced outage masih perlu dikendalikan
MTBF (jam)	720	756	804	840	Meningkat, menunjukkan interval antar gangguan membaik
MTTR (jam)	28	26	24	22	Menurun, tetapi waktu pemulihan masih dapat dioptimalkan
Biaya PM (Rp miliar)	12,4	13,2	14,1	14,8	Meningkat sehingga perlu konsolidasi dan prioritas pekerjaan

Sumber: Laporan Perusahaan UPKM (Persero), 2025

Berdasarkan Tabel 1.1, terlihat bahwa indikator keandalan mengalami perbaikan dari tahun ke tahun, antara lain ditunjukkan oleh peningkatan EAF, penurunan FOR, peningkatan MTBF, dan penurunan MTTR. Namun, nilai EAF masih berada pada kisaran 78–82%, sehingga masih terdapat ruang perbaikan untuk meningkatkan kesiapan unit. Di sisi lain, biaya pemeliharaan mengalami peningkatan dari Rp12,4 miliar menjadi Rp14,8 miliar. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas dan biaya pemeliharaan belum tentu sepenuhnya mencerminkan efektivitas pemeliharaan apabila tidak diikuti dengan pengelolaan pekerjaan yang lebih terstruktur dan terkonsolidasi.

Sehingga kondisi operasional di lapangan saat ini menunjukkan bahwa opsi untuk melakukan pemeliharaan sangat terbatas. Kebutuhan sistem yang tinggi seringkali memaksa manajemen untuk menunda jadwal pemeliharaan mesin yang seharusnya dilakukan sesuai jam operasi (*running hours*). Dampak dari penundaan pemeliharaan ini sangat signifikan; mesin sering mengalami gangguan mendadak akibat kondisi komponen yang sudah melewati batas waktu pemakaian (*overdue maintenance*), yang pada akhirnya justru menurunkan indeks keandalan sistem secara keseluruhan (Dhillon, 2006). Sebagai solusi jangka pendek, saat ini diterapkan dua metode pemeliharaan yang masing-masing memiliki konsekuensi tersendiri. Metode *Hot Maintenance* memungkinkan pemeliharaan dilakukan tanpa mematikan unit sepenuhnya, namun efektivitasnya sangat rendah karena keterbatasan akses pada

komponen inti dan risiko keselamatan yang lebih tinggi, sehingga hasil pemeliharaan tidak maksimal. Di sisi lain, metode *Cold Maintenance* memberikan ruang bagi pemeliharaan menyeluruh dalam kondisi mesin *standby* total, namun hal ini menyebabkan sistem mengalami defisit daya karena hilangnya kapasitas pembangkitan dalam durasi yang lama (Mobley, 2002).

Dilema antara kualitas pemeliharaan dan ketersediaan daya ini menuntut adanya sebuah terobosan manajerial dan teknis. Pendekatan **Optimasi Konsolidasi** diusulkan sebagai solusi strategis untuk menjembatani kedua kepentingan tersebut. Dengan melakukan klasterisasi terhadap jenis pekerjaan, manajemen dapat menentukan secara presisi bagian mana yang dapat dikerjakan melalui *Hot Maintenance* dan bagian mana yang mutlak memerlukan *Cold Maintenance*. Konsolidasi ini bertujuan untuk menciptakan sebuah paket pekerjaan yang terintegrasi, sehingga pemanfaatan jendela pemadaman (*outage window*) dapat dilakukan secara optimal.

Melalui model optimasi ini, diharapkan terjadi efektivitas pemeliharaan yang lebih baik karena durasi *outage* dapat dipangkas tanpa mengurangi kualitas pekerjaan teknis. Hal ini sangat penting untuk memperbaiki performa pembangkit yang diukur melalui indikator *Equivalent Availability Factor* (EAF) dan menekan angka *Forced Outage Rate* (FOR) (Heizer & Render, 2017). Dengan adanya model yang tervalidasi, PLTMG Ambon Peaker dapat menyajikan jadwal pemeliharaan yang lebih kredibel kepada manajemen, yang tidak hanya menjamin kesehatan mesin tetapi juga menjaga stabilitas pasokan listrik pada sistem Ambon yang terisolasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan model optimasi konsolidasi pemeliharaan yang berbasis pada kriteria teknis, operasional, keselamatan, dan efisiensi sumber daya untuk meningkatkan keandalan operasional secara menyeluruh.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-analitis dengan dukungan model optimasi konsolidasi. Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada konteks spesifik PLTMG Ambon Peaker sebagai pembangkit peaker dalam sistem kelistrikan terisolasi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip studi kasus yang menekankan kedalaman analisis terhadap fenomena pada konteks nyata (Yin, 2018a). Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik pekerjaan pemeliharaan, sedangkan pendekatan analitis digunakan untuk menyusun model, melakukan skoring, membentuk paket *outage*, dan mengevaluasi dampaknya terhadap indikator keandalan. Desain penelitian diarahkan untuk menghasilkan model operasional-kuantitatif yang dapat digunakan untuk mendukung penyusunan paket pekerjaan pemeliharaan, bukan sebagai model matematis abstrak yang terlepas dari praktik lapangan.

Penelitian ini menggunakan model Model optimasi konsolidasi yang dikembangkan untuk menentukan keputusan pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan secara lebih terstruktur. Model ini menggunakan pendekatan keputusan biner karena keputusan utama bersifat memilih apakah suatu pekerjaan dilakukan secara Hot, Cold, atau dimasukkan ke dalam paket *planned outage*. Formulasi model mempertimbangkan tujuan minimasi biaya, downtime, risiko, dan frekuensi *outage*, serta maksimasi manfaat keandalan (Hadidi et al., 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hot Maintenance adalah strategi pemeliharaan yang dilakukan pada kondisi peralatan masih beroperasi atau dalam keadaan panas (*elevated temperature*) (Beagle et al., 2021). Menurut (Vilas Boas et al., 2021) *Hot Maintenance* memungkinkan mesin tetap beroperasi pada *reduced load* atau *idle condition* sementara pekerjaan pemeliharaan dilakukan pada komponen-komponen tertentu yang *accessible*. Strategi ini sangat relevan untuk pembangkit *peaker* yang memiliki *high opportunity Cost* untuk *downtime*.

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-analitis dengan dukungan model optimasi konsolidasi. Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada konteks spesifik PLTMG Ambon Peaker sebagai pembangkit peaker dalam sistem kelistrikan terisolasi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip studi kasus yang menekankan kedalaman analisis terhadap fenomena pada konteks nyata (Yin, 2018a). Pendekatan deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik pekerjaan pemeliharaan, sedangkan pendekatan analitis digunakan untuk menyusun model, melakukan scoring, membentuk paket outage, dan mengevaluasi dampaknya terhadap indikator keandalan. Desain penelitian diarahkan untuk menghasilkan model operasional-kuantitatif yang dapat digunakan untuk mendukung penyusunan paket pekerjaan pemeliharaan, bukan sebagai model matematis abstrak yang terlepas dari praktik lapangan.

Penelitian ini menggunakan model Model optimasi konsolidasi yang dikembangkan untuk menentukan keputusan pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan secara lebih terstruktur. Model ini menggunakan pendekatan keputusan biner karena keputusan utama bersifat memilih apakah suatu pekerjaan dilakukan secara *Hot*, *Cold*, atau dimasukkan ke dalam paket *planned outage*. Formulasi model mempertimbangkan tujuan minimasi biaya, downtime, risiko, dan *frekuensi outage*, serta maksimasi manfaat keandalan (Hadidi et al., 2015).

Cold Maintenance adalah strategi pemeliharaan yang dilakukan dengan menghentikan operasi unit pembangkit secara terencana (*planned Outage*), sehingga mesin berada dalam kondisi dingin dan aman untuk dilakukan inspeksi serta perbaikan menyeluruh. Strategi ini memberikan *full access* ke seluruh komponen untuk inspeksi, *repair*, dan *overhaul* yang *comprehensive* (Al-Turki et al., 2019).

Penerapan model optimasi konsolidasi Hot dan Cold Maintenance pada PLTMG Ambon Peaker. Analisis dilakukan dengan menganggap data operasional, estimasi pekerjaan, parameter biaya, durasi, sumber daya, dan hasil scoring konsolidasi telah valid untuk digunakan sebagai dasar simulasi model. Hasil pembahasan diarahkan untuk menilai apakah konsolidasi pekerjaan pemeliharaan dapat mengurangi frekuensi outage, menurunkan downtime, meningkatkan efektivitas penggunaan sumber daya, serta memberi dampak positif terhadap indikator keandalan operasional.

a. Hasil Identifikasi dan Klasifikasi Pekerjaan Pemeliharaan

Tahap awal penerapan model dilakukan dengan menyusun daftar pekerjaan pemeliharaan yang relevan terhadap kondisi PLTMG Ambon Peaker. Setiap pekerjaan diklasifikasikan berdasarkan kondisi pelaksanaan, kebutuhan *outage*, risiko keselamatan, urgensi teknis, kebutuhan sumber daya, estimasi durasi, estimasi biaya, dan dampaknya terhadap keandalan. Klasifikasi ini menjadi fondasi untuk menentukan apakah pekerjaan tetap dilakukan sebagai *Hot Maintenance*, wajib dilakukan dalam kondisi *Cold Maintenance*, atau lebih tepat digabungkan dalam satu *planned outage*.

Tabel 2. Ringkasan Klasifikasi Pekerjaan Pemeliharaan

Kategori Pekerjaan	Jumlah Pekerjaan	Karakteristik Utama	Arah Keputusan
<i>Hot Maintenance</i>	8	Inspeksi visual, monitoring parameter, pembersihan ringan, pengecekan eksternal, sampling/backup data, dan pekerjaan rutin yang tidak membutuhkan <i>shutdown</i>	Dilakukan tanpa <i>shutdown</i> sebagai <i>hot/routine</i>
<i>Cold Maintenance / Consolidated Planned Outage</i>	19	Membutuhkan akses internal, isolasi energi, pembongkaran, pengujian komprehensif, atau pekerjaan yang berdampak langsung terhadap keandalan	Dikonsolidasikan ke paket <i>planned outage</i>
FGD Review	3	Skor berada pada zona transisi atau membutuhkan klarifikasi pakar, terutama pekerjaan <i>borderline</i> yang terkait risiko operasi/K3	Divalidasi melalui diskusi teknis sebelum keputusan final
Total dianalisis	30	Gabungan pekerjaan rutin, preventif, korektif ringan, berbasis kondisi, dan pekerjaan validasi pasca-outage	Masuk model skoring dan optimasi konsolidasi

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa dari 30 pekerjaan yang dianalisis, 8 pekerjaan dapat dikelola sebagai *Hot Maintenance/routine*, 19 pekerjaan masuk kategori *Cold Maintenance* yang layak dikonsolidasikan ke dalam paket *planned outage*, dan 3 pekerjaan berada pada kategori FGD Review. Sebagian besar pekerjaan yang memiliki kontribusi besar terhadap keandalan membutuhkan kondisi *Cold Maintenance* karena memerlukan akses internal, isolasi energi, pembongkaran komponen, inspeksi mendalam, atau pengujian proteksi. Namun, pekerjaan *Cold* tidak sebaiknya dilakukan secara terpisah-pisah karena dapat meningkatkan frekuensi penghentian unit.

b. Hasil Skoring Konsolidasi Pekerjaan

Model skoring konsolidasi digunakan untuk menentukan prioritas pekerjaan yang layak masuk ke dalam paket *planned outage*. Skor konsolidasi dihitung dengan mempertimbangkan kebutuhan *outage*, risiko jika dikerjakan pada kondisi *Hot*, dampak terhadap keandalan, durasi, kebutuhan sumber daya, potensi penggabungan, urgensi teknis, dan dampak terhadap KPI keandalan.

Tabel 3. Hasil Skoring Konsolidasi Pekerjaan Prioritas

Kode	Pekerjaan	Skor	Kategori	Paket
M-01	Borescope inspection cylinder dan combustion chamber	0,89	Consolidated Cold	PO-Q1

Kode	Pekerjaan	Skor	Kategori	Paket
M-02	Valve clearance inspection dan adjustment	0,86	Consolidated Cold	PO-Q1
E-01	Insulation resistance test generator	0,84	Consolidated Cold	PO-Q1
IC-01	Relay protection test dan kalibrasi proteksi	0,82	Consolidated Cold	PO-Q1
M-03	Turbocharger inspection dan cleaning	0,81	Consolidated Cold	PO-Q2
M-04	Fuel gas valve inspection dan functional test	0,79	Consolidated Cold	PO-Q2
E-02	Inspection terminal generator dan panel outgoing	0,77	Consolidated Cold	PO-Q3
IC-02	Post-maintenance performance test dan reliability checklist	0,76	Consolidated Cold	PO-Q3
H-01	Visual inspection leak, vibration, dan abnormal noise	0,43	Hot Maintenance	Routine
H-02	Monitoring temperatur, pressure, dan parameter operasi	0,41	Hot Maintenance	Routine

Tabel 4.3 memperlihatkan bahwa pekerjaan dengan skor konsolidasi tinggi umumnya memiliki karakteristik teknis yang membutuhkan akses lebih aman, kualitas inspeksi lebih mendalam, serta memiliki dampak langsung terhadap potensi *forced outage*. Sebaliknya, pekerjaan inspeksi visual dan monitoring parameter tetap relevan dilakukan sebagai *Hot Maintenance* karena tidak membutuhkan pembongkaran dan tidak memerlukan *outage window*.

c. Hasil Pembentukan Paket *Planned Outage*

Setelah skor konsolidasi dihitung, pekerjaan *Cold* yang memiliki kompatibilitas teknis dan kebutuhan sumber daya yang dapat dikelola kemudian dikelompokkan ke dalam paket *planned outage*. Tujuan pembentukan paket adalah mengurangi frekuensi penghentian unit, menghindari pekerjaan berulang, dan memastikan pekerjaan yang memiliki kebutuhan akses serupa dapat dikerjakan dalam satu kesempatan *outage*.

Tabel 4. Hasil Pembentukan Paket *Planned Outage*

Paket Outage	Jumlah Pekerjaan	Durasi Bruto (jam)	Durasi Netto (jam)	Window (jam)	Status
PO-Q1	9	90,00	73,80	84	<i>Feasible</i>
PO-Q2	5	54,00	44,28	84	<i>Feasible</i>

Paket Outage	Jumlah Pekerjaan	Durasi Bruto (jam)	Durasi Netto (jam)	Window (jam)	Status
PO-Q3	5	54,00	44,28	84	<i>Feasible</i>
PO-Q4	0	0,00	0,00	84	<i>Contingency window</i>

Seluruh paket outage yang dibentuk masih berada di bawah batas outage window sebesar 84 jam. Paket PO-Q1 merupakan paket dengan beban pekerjaan terbesar, yaitu 9 pekerjaan dengan durasi netto 73,80 jam. PO-Q4 diposisikan sebagai *contingency window* untuk mengantisipasi pekerjaan tambahan, pekerjaan korektif yang muncul kemudian, atau kondisi sistem yang membutuhkan perubahan jadwal.

d. Perbandingan Skenario Baseline dan Model Konsolidasi

Evaluasi utama dilakukan dengan membandingkan kondisi *baseline existing* dan kondisi setelah penerapan model konsolidasi. Kondisi baseline menggambarkan pola pekerjaan *Cold Maintenance* yang masih tersebar dalam beberapa penghentian unit. Skenario model konsolidasi menggambarkan kondisi setelah pekerjaan *Cold* dikelompokkan ke dalam paket *planned outage* yang lebih sedikit tetapi lebih terencana.

Tabel 5. Perbandingan Skenario *Baseline* dan Model Konsolidasi

Indikator	Baseline Existing	Model Konsolidasi	Perubahan	Interpretasi
Jumlah outage cold/tahun	18 kali	3 kali	Turun 15 kali (83,3%)	Frekuensi shutdown berulang berkurang signifikan
Total durasi outage cold	198 jam	162,36 jam	Turun 35,64 jam (18,0%)	Downtime tahunan lebih rendah
Total biaya cold	Rp2.779 juta	Rp1.353,6 juta	Hemat Rp1.425,4 juta (51,3%)	Efisiensi biaya mobilisasi dan pekerjaan berulang
Rata-rata durasi per outage	11 jam	54,12 jam	Naik per kejadian	Outage lebih panjang tetapi lebih sedikit dan terencana
Pekerjaan terkonsolidasi	Belum terstruktur	19 pekerjaan	Meningkat	Pekerjaan Cold masuk paket <i>planned outage</i>
Pekerjaan FGD Review	Tidak eksplisit	3 pekerjaan	Perlu validasi	Butuh keputusan pakar sebelum finalisasi

Hasil pada Tabel 1.5 menunjukkan bahwa model konsolidasi memberikan dampak operasional yang kuat. Jumlah *outage cold* menurun dari 18 kali menjadi 3 kali per tahun, atau turun sekitar 83,3%. Pada sistem kelistrikan terisolasi, setiap penghentian unit memiliki konsekuensi terhadap fleksibilitas operasi dan kontinuitas pasokan. Total durasi *outage* juga

menurun dari 198 jam menjadi 162,36 jam, atau berkurang 35,64 jam, yang menunjukkan adanya efisiensi waktu akibat penggabungan pekerjaan.

Dari sisi biaya, model menunjukkan potensi penghematan sebesar Rp1.425,4 juta atau sekitar 51,3% dari komponen biaya *Cold Maintenance* yang dianalisis. Penghematan ini tidak dimaknai sebagai hilangnya kebutuhan pekerjaan teknis, tetapi sebagai efisiensi akibat berkurangnya mobilisasi berulang, setup pekerjaan, koordinasi, waktu tunggu, pekerjaan rework, dan kebutuhan vendor yang terpisah-pisah.

e. Dampak terhadap Indikator Keandalan Operasional

Dampak model konsolidasi terhadap keandalan dievaluasi melalui empat indikator utama, yaitu EAF, FOR, MTBF, dan MTTR. Keempat indikator ini digunakan karena mampu menggambarkan ketersediaan unit, gangguan tidak terencana, interval antar kegagalan, dan waktu pemulihan setelah gangguan.

Tabel 6. Estimasi Dampak Model terhadap KPI Keandalan

KPI	Baseline 2024	Target	Setelah Konsolidasi	Status	Interpretasi
EAF (%)	81,50	85,00	82,48	Belum mencapai target	Membaik tetapi masih perlu dukungan perbaikan lain
FOR (%)	8,50	7,00	6,70	Memenuhi	Gangguan paksa berpotensi menurun
MTBF (jam)	840	900	926,5	Memenuhi	Interval antar kegagalan meningkat
MTTR (jam)	22	20	19,74	Memenuhi	Waktu pemulihan lebih cepat

FOR menurun dari 8,50% menjadi 6,70%, memenuhi target maksimum 7,00%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pekerjaan yang berpotensi menyebabkan gangguan paksa dapat dikelola lebih baik melalui *planned outage*. MTBF meningkat dari 840 jam menjadi 926,5 jam, menunjukkan bahwa interval antar kegagalan menjadi lebih panjang. MTTR juga menurun dari 22 jam menjadi 19,74 jam, yang berarti waktu pemulihan dapat dipersingkat karena pekerjaan, material, tools, vendor, dan tenaga kerja telah direncanakan dalam paket yang lebih siap.

EAF meningkat dari 81,50% menjadi 82,48%, tetapi belum mencapai target 85%. Kondisi ini penting secara akademik karena menunjukkan bahwa model tidak menghasilkan klaim yang berlebihan. EAF tidak hanya dipengaruhi oleh strategi pemeliharaan, tetapi juga oleh kondisi operasi, *dispatch*, *derating*, *forced outage*, dan faktor eksternal sistem.

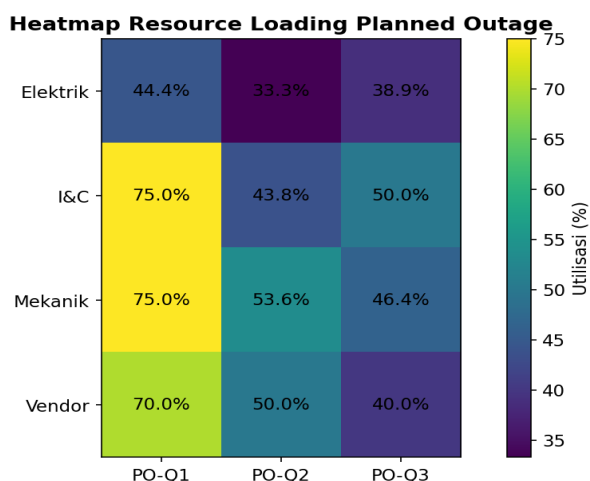
f. Analisis Kelayakan Sumber Daya

Seluruh paket outage masih feasible dari sisi sumber daya. PO-Q1 memiliki beban tertinggi, terutama pada tenaga mekanik dan I&C masing-masing sebesar 75,0% dari kapasitas tersedia. PO-Q2 memiliki utilisasi tertinggi pada tenaga mekanik sebesar 46,4%, sedangkan PO-Q3 memiliki utilisasi tertinggi pada tenaga elektrik sebesar 50,0%. PO-Q4 diposisikan sebagai contingency/tidak aktif apabila tidak terdapat pekerjaan tambahan. Seluruh nilai masih berada di

bawah kapasitas maksimum, sehingga paket planned outage dinilai layak dilaksanakan dengan pengaturan jadwal kerja yang baik.

Tabel 7. Resource Loading Paket *Planned Outage*

Paket	Mekanik	Elektrik	I&C	Vendor	Status
PO-Q1	21/28 manday (75,0%)	8/18 manday (44,4%)	12/16 manday (75,0%)	7/10 manday (70,0%)	Feasible
PO-Q2	13/28 manday (46,4%)	6/18 manday (33,3%)	7/16 manday (43,8%)	4/10 manday (40,0%)	Feasible
PO-Q3	12/28 manday (42,9%)	9/18 manday (50,0%)	5/16 manday (31,3%)	3/10 manday (30,0%)	Feasible
PO-Q4	0/28 manday (0,0%)	0/18 manday (0,0%)	0/16 manday (0,0%)	0/10 manday (0,0%)	Contingency / Tidak Aktif



g. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menilai ketahanan hasil model terhadap perubahan asumsi utama. Tiga skenario digunakan: konservatif, moderat, dan optimistis. Metode ini penting karena keputusan pemeliharaan sering dipengaruhi oleh perubahan prioritas operasional.

Tabel 8. Analisis Sensitivitas Efisiensi Konsolidasi

Skenario	Efisiensi Waktu	Total Outage (jam)	EAF Estimasi (%)	FOR Estimasi (%)	Catatan
Konservatif	10%	178,20	82,10	7,20	Efisiensi terbatas, sebagian pekerjaan masih berpotensi bergeser

Skenario	Efisiensi Waktu	Total Outage (jam)	EAF Estimasi (%)	FOR Estimasi (%)	Catatan
Moderat (Baseline)	18%	162,36	82,48	6,70	Skenario utama model
Optimistis	25%	148,50	82,85	6,25	Kesiapan material dan paralelisasi pekerjaan lebih baik

Hasil sensitivitas menunjukkan bahwa model tetap memberikan arah perbaikan pada seluruh skenario. Pada skenario konservatif, total *outage* masih lebih rendah dibanding baseline 198 jam. Pada skenario optimistis, total outage dapat turun menjadi 148,50 jam dengan EAF estimasi 82,85% dan FOR 6,25%. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat konsolidasi cukup stabil meskipun tingkat efisiensi pelaksanaan berubah.

HASIL MODEL OPTIMASI

1. Efektivitas terhadap Pengurangan Frekuensi *Outage*

Temuan paling kuat dari model adalah penurunan frekuensi outage cold dari 18 kali menjadi 3 kali per tahun. Dalam konteks PLTMG Ambon Peaker sebagai pembangkit peaker pada isolated system, pengurangan frekuensi outage memiliki nilai strategis. Unit peaker harus tersedia untuk merespons perubahan beban dan kondisi sistem. Semakin sering unit dihentikan untuk pekerjaan pemeliharaan yang terpisah-pisah, semakin besar risiko berkurangnya fleksibilitas operasi sistem.

2. Efektivitas terhadap *Downtime* dan *Outage Window*

Penurunan total outage dari 198 jam menjadi 162,36 jam menunjukkan bahwa konsolidasi dapat meningkatkan efektivitas outage window. Efisiensi waktu diperoleh dari pengurangan aktivitas berulang seperti proses *shutdown*, pendinginan, isolasi energi, permit to work, mobilisasi tenaga kerja, persiapan tools, dan pengujian pasca pekerjaan. Dalam model konsolidasi, aktivitas tersebut dilakukan dalam satu paket pekerjaan yang lebih terintegrasi.

3. Efektivitas Terhadap Biaya Pemeliharaan

Model menunjukkan potensi penghematan biaya *Cold Maintenance* sebesar Rp1.425,4 juta. Penghematan ini terutama berasal dari efisiensi biaya tidak langsung, yaitu pengurangan mobilisasi berulang, efisiensi penggunaan vendor, pengurangan waktu tunggu, pengurangan setup pekerjaan, serta penurunan potensi pekerjaan ulang. Dengan demikian, konsolidasi tidak berarti mengurangi kualitas pekerjaan, tetapi mengurangi inefisiensi proses pelaksanaan.

4. Efektivitas terhadap Keandalan Operasional

Dampak terhadap keandalan terlihat dari membaiknya FOR, MTBF, dan MTTR. Penurunan FOR menunjukkan bahwa potensi gangguan tidak terencana dapat ditekan karena pekerjaan kritis dipindahkan ke planned outage. Peningkatan MTBF menunjukkan bahwa interval antar kegagalan dapat diperpanjang melalui inspeksi dan tindakan preventif yang lebih menyeluruh.

dan pembahasan bisa dibagi ke dalam beberapa sub bahasan. Pemaparan hasil dan pembahasan harus memberikan deskripsi yang jelas dan tepat mengenai temuan penelitian, interpretasi penulis

terhadap temuan tersebut, dan kesimpulan yang dapat ditarik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengembangan dan penerapan model optimasi konsolidasi *Hot* dan *Cold Maintenance* pada PLTMG Ambon Peaker, penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Karakteristik pemeliharaan PLTMG Ambon Peaker menunjukkan adanya kebutuhan untuk membedakan pekerjaan yang dapat dilakukan pada kondisi *Hot*, pekerjaan yang memerlukan kondisi *Cold*, serta pekerjaan yang lebih tepat dikonsolidasikan dalam *planned outage*. Pemisahan ini penting karena PLTMG Ambon Peaker beroperasi sebagai pembangkit peaker pada sistem kelistrikan terisolasi, sehingga setiap keputusan outage perlu mempertimbangkan kesiapan unit, kontinuitas pasokan, risiko teknis, dan keterbatasan *outage window*.
2. XModel optimasi konsolidasi yang dikembangkan mampu memberikan struktur pengambilan keputusan yang lebih sistematis melalui kombinasi klasifikasi pekerjaan, skor konsolidasi, pemetaan paket *outage*, kendala sumber daya, dan evaluasi indikator keandalan. Model ini tidak hanya menilai apakah suatu pekerjaan termasuk *Hot* atau *Cold Maintenance*, tetapi juga menentukan pekerjaan mana yang layak digabungkan dalam satu paket *planned outage*.
3. Hasil penerapan model menunjukkan bahwa konsolidasi pekerjaan pemeliharaan mampu menurunkan frekuensi *outage cold* dari 18 kali per tahun menjadi 3 kali per tahun, atau penurunan sebesar 83,3%. Penurunan ini menunjukkan bahwa pekerjaan yang sebelumnya tersebar dalam beberapa penghentian unit dapat dikelompokkan ke dalam paket *planned outage* yang lebih terencana.
4. Total durasi *outage cold* mengalami penurunan dari 198 jam pada kondisi *baseline* menjadi 162,36 jam pada model konsolidasi, atau berkurang 18%. Konsolidasi dapat meningkatkan efektivitas pemanfaatan *outage window* melalui penggabungan pekerjaan, pengurangan pekerjaan berulang, dan peningkatan kesiapan sumber daya.
5. Dari sisi biaya, model konsolidasi menghasilkan estimasi penurunan biaya *cold maintenance* dari Rp2.779 juta menjadi Rp1.353,6 juta. Estimasi penghematan sebesar Rp1.425,4 juta atau sekitar 51,3% terutama berasal dari pengurangan mobilisasi berulang, efisiensi vendor, pengurangan setup pekerjaan, dan peningkatan kesiapan material dan tenaga kerja.
6. Dampak terhadap indikator keandalan menunjukkan perbaikan pada beberapa parameter utama: EAF meningkat dari 81,5% menjadi 82,48%, FOR turun dari 8,5% menjadi 6,70%, MTBF meningkat dari 840 jam menjadi 926,5 jam, dan MTTR turun dari 22 jam menjadi 19,74 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa konsolidasi *Hot* dan *Cold Maintenance* dapat mendukung peningkatan keandalan operasional.
7. Meskipun EAF meningkat, nilai hasil model belum mencapai target 85%. Hal ini menunjukkan bahwa konsolidasi pemeliharaan memberikan kontribusi positif, tetapi peningkatan EAF secara lebih signifikan tetap memerlukan dukungan faktor lain seperti

pengendalian derating, kesiapan spare part kritis, kualitas eksekusi pekerjaan, dan koordinasi operasi sistem.

8. Model optimasi konsolidasi *Hot* dan *Cold* Maintenance yang dikembangkan dapat digunakan sebagai decision-support framework bagi pengelola PLTMG Ambon Peaker untuk menyusun paket pekerjaan pemeliharaan tahunan, menentukan prioritas pekerjaan, mengevaluasi kelayakan outage, dan menghubungkan perencanaan pemeliharaan dengan indikator keandalan operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Ameer, T. A., Ab Rahman, M. N., & Muhamad, N. (2023). Analysing Effective and Ineffective Impacts of Maintenance Strategies on Electric Power Plants: A Comprehensive Approach. *Energies*, 16(17). doi: 10.3390/en16176243
- Al-Turki, U., Duffuaa, S., & Bendaya, M. (2019). Trends in turnaround maintenance planning: literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(2), 253–271. doi: 10.1108/JQME-10-2017-0074
- Avdić, A., Konjić, T., & Dautbašić, N. (2020). Auxiliary Power Systems of Advanced Thermal Power Plants. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 83, pp. 117–125). Springer. doi: 10.1007/978-3-030-24986-1_9
- Beagle, D., Moran, B., McDufford, M., & Merine, M. (2021). *HEAVY-DUTY GAS TURBINE OPERATING AND MAINTENANCE CONSIDERATIONS*.
- Carazas, F. J. G., & De Souza, G. F. M. (2009). Availability Analysis of Gas Turbines Used in Power Plants. *International Journal of Thermodynamics*, 12(1), 28–37. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijot/article/222649>
- Darrow, K., Tidball, R., Wang, J., & Hampson, A. (2015). *Catalog of CHP Technologies: Reciprocating Engines*. U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership. Retrieved from <https://www.epa.gov/chp/chp-technologies>
- KORCZEWSKI, Z. (1998). *MARINE ENGINEERING Endoscopic examination of naval gas turbines. Laurent Cornu, Product Manager, 9HA Gas Turbine ADVANCEMENTS IN H CLASS GAS TURBINES FOR COMBINED CYCLE POWER PLANTS FOR HIGH EFFICIENCY, ENHANCED OPERATIONAL CAPABILITY AND BROAD FUEL*. (2016).
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From corrective to predictive maintenance — A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, 23(13), 5970. doi: 10.3390/s23135970
- Narayanan, S., Bhatt, K., & Shad, M. (2022). Condition-based monitoring and maintenance: State of the art review. *Applied Sciences*, 12(2), 688. doi: 10.3390/app12020688
- Niggemeier, M.-L., & Roth, Dr. P. (2024). Backbone of the energy transition: How gas engine power plants can close the gap [White paper]. *Mtu Solutions (Rolls-Royce Power Systems)*.
- ISO 14224. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT.
- Pincioli, L., Baraldi, P., & Zio, E. (2023). Maintenance optimization in Industry 4.0. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109204. doi: 10.1016/j.ress.2023.109204

- Saputra, R. A., & Aribowo, D. (2022). *ANALISIS EFEKTIVITAS MESIN DIESEL WARTSILA W20V34DF BERBASIS PERFORMANCE TEST (PT) PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MESIN GAS (PLTMG) AMBON*. Vol. 1, No. 2. doi: <https://doi.org/10.58169/saintek.v1i2.79>
- Tiddens, W. W., Braaksma, A. J. J., & Tinga, T. (2023). Maintenance work preparation: A key activity for closing the gap between theory and practice. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(2), 362–385. doi: 10.1108/JQME-05-2021-0041
- Vilas Boas, F. M., Borges-Da-silva, L. E., Villa-Nova, H. F., Bonaldi, E. L., Oliveira, L. E. L., Lambert-Torres, G., Assuncao, F. de O., Costa, C. I. D e A., Campos, M. M., Sant'ana, W. C., Lacerda, J., da Silva Junior, J. L. M., & da Silva, E. G. (2021). Condition monitoring of internal combustion engines in thermal power plants based on control charts and adapted nelson rules. *Energies*, 14(16). doi: 10.3390/en14164924
- WÄRTSILÄ. (2007). *WÄRTSILÄ 46F PROJECT GUIDE WÄRTSILÄ 46F-PROJECT GUIDE*.