

KAJIAN KELAYAKAN CONDITION BASE MAINTENANCE TERHADAP INTERVAL OVERHAUL TM2500 PT PLN BATAM

Arif Budiman¹, Syamsir Abduh², Marwan Rosyadi³

^{1,2,3} Institut Teknologi PLN, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, Indonesia

¹arif2310027@itpln.ac.id

²syamsir@itpln.ac.id

³marwanrosyadi@itpln.ac.id

Abstract—Operational cost inefficiency resulting from the misalignment between maintenance strategies and actual asset degradation is a critical challenge for aero-derivative gas turbines in isolated grid systems. Conventional Time-Based Maintenance (TBM) practices, which enforce rigid overhaul intervals every 12,500 hours, often trigger over-maintenance by overlooking the variability of thermodynamic conditions and mechanical integrity. This study proposes a strategic transition toward Condition-Based Maintenance (CBM) through the development of a "Gatekeeper Algorithm" that integrates critical thermodynamic parameters (T48, PS3) with direct visual validation via Borescope Inspection (BSI). This approach positions visual data as the final validator in economic decisions, ensuring technical safety before the economic value of the asset is exploited. Through a techno-economic Cost-Benefit Analysis (CBA) on a fleet of 20 TM2500 units at PT PLN Batam, this strategy is proven to generate significant efficiencies. Simulation results indicate potential direct cost savings of USD 5,614,431 annually with a Benefit-Cost Ratio (BCR) reaching 2.36. These findings imply that integrating BSI within the CBM framework not only enhances reliability but also establishes a new standard for adaptive and financially efficient asset management.

Keywords—Condition-Based Maintenance, Gatekeeper Algorithm, Borescope Inspection, Cost-Benefit Analysis, Aero-derivative Gas Turbine.

Intisari—Inefisiensi biaya operasional akibat ketidakselarasan strategi pemeliharaan dengan degradasi aktual aset menjadi tantangan kritis pada turbin gas aero-derivatif di sistem isolated grid. Praktik konvensional Time-Based Maintenance (TBM) yang memberlakukan interval overhaul kaku setiap 12.500 jam sering kali memicu over-maintenance, karena mengabaikan variabilitas kondisi termodinamika dan integritas mekanikal mesin. Penelitian ini mengusulkan transisi strategis menuju Condition-Based Maintenance (CBM) melalui pengembangan "Algoritma Gatekeeper" yang mengintegrasikan parameter termodinamika kritis (T48, PS3) dengan validasi visual langsung melalui Borescope Inspection (BSI). Pendekatan ini menempatkan data visual sebagai penentu akhir dalam keputusan ekonomi, memastikan keamanan teknis sebelum eksploitasi nilai ekonomi aset dilakukan. Melalui analisis tekno-ekonomi (Cost-Benefit Analysis) pada armada 20 unit TM2500 di PT PLN Batam, strategi ini terbukti mampu menghasilkan efisiensi signifikan. Hasil simulasi menunjukkan potensi penghematan biaya langsung sebesar USD 5.614.431 per tahun dengan nilai Benefit-Cost Ratio (BCR) mencapai 2,36. Temuan ini mengimplikasikan bahwa integrasi BSI dalam kerangka CBM bukan hanya meningkatkan reliabilitas, tetapi juga menetapkan standar

manajemen aset baru yang adaptif dan efisien secara finansial.

Kata Kunci—Pemeliharaan Berbasis Kondisi, Algoritma Gatekeeper, Inspeksi Borescope, Analisis Biaya-Manfaat, Turbin Gas Aero-derivatif etakkan 4-8 kata kunci Anda di sini, kata kunci dipisahkan dengan koma.

I. PENDAHULUAN

Dinamika transisi energi global dan tekanan ekonomi makro saat ini telah memaksa industri ketenagalistrikan untuk melakukan reevaluasi mendasar terhadap struktur biaya operasional mereka. Di tengah tuntutan dekarbonisasi dan keandalan pasokan, manajemen aset fisik tidak lagi sekadar fungsi pendukung teknis, melainkan telah bertransformasi menjadi pilar strategis yang menentukan viabilitas ekonomi perusahaan utilitas [1]. Tantangan ini terasa semakin kompleks dalam konteks kepulauan Indonesia, di mana keandalan pasokan sangat bergantung pada sistem pembangkitan terdistribusi (distributed generation) yang melayani jaringan terisolasi (isolated grid). Unit turbin gas modular aero-derivatif, seperti TM2500, telah menjadi solusi teknis andal karena fleksibilitas operasionalnya. Namun, keunggulan teknis ini sering kali tergerus oleh beban biaya pemeliharaan yang tidak proporsional akibat penerapan strategi manajemen yang masih bersifat statis dan konservatif.

Inefisiensi biaya tersebut berakar pada ketidakmampuan strategi konvensional untuk menangkap dinamika degradasi mesin secara akurat. Seiring dengan transformasi digital industri atau Industri 4.0, terjadi pergeseran paradigma yang signifikan dari pendekatan reaktif dan preventif menuju strategi prediktif yang berbasis data. Inisiatif efisiensi energi kini tidak lagi hanya berfokus pada sisi konsumsi bahan bakar (heat rate), tetapi meluas pada efisiensi siklus hidup aset (asset lifecycle efficiency) [2]. Dalam perspektif ini, setiap intervensi pemeliharaan yang dilakukan secara prematur merepresentasikan alokasi sumber daya kapital yang tidak efisien, sementara kegagalan yang tidak terprediksi membawa risiko kerugian ekonomi dan reputasi yang fatal. Oleh karena itu, optimasi interval pemeliharaan turbin gas melalui pendekatan berbasis kondisi (Condition-Based Maintenance/CBM) bukan lagi sekadar opsi teknis, melainkan kebutuhan strategis yang mendesak [3].

Meskipun kebutuhan akan efisiensi semakin mendesak, dominasi strategi Time-Based Maintenance (TBM) dalam industri pembangkitan masih bertahan selama beberapa dekade, terutama didorong oleh kemudahan administratif dan persepsi keamanan yang konservatif. Pada unit TM2500 Gen4 SAC, rekomendasi Original Equipment Manufacturer (OEM) umumnya menetapkan batas interval 12.500 jam operasi untuk pelaksanaan hot section overhaul. Pendekatan deterministik ini berasumsi bahwa laju degradasi komponen bersifat seragam dan linier terhadap waktu. Akan tetapi, realitas operasional di lapangan menunjukkan variabilitas yang ekstrem; unit yang beroperasi pada beban dasar (base load) dengan bahan bakar gas bersih tentu memiliki profil keausan yang jauh berbeda dibandingkan unit peaker berbahan bakar cair (High Speed Diesel) yang mengalami frekuensi siklus termal tinggi [4].

Ketidaksesuaian antara asumsi jadwal pabrikan dan kondisi operasional nyata inilah yang memicu inefisiensi. Literatur akademik secara konsisten menyoroti bahwa penerapan TBM yang kaku sering kali menghasilkan fenomena "pemeliharaan berlebih" (over-maintenance), sebuah kondisi kontradiksi di mana komponen yang sejatinya masih memiliki sisa usia pakai (Remaining Useful Life/RUL) signifikan dipaksa untuk diganti atau direkondisi demi mematuhi jadwal kalender. Fenomena teoretis ini tecermin secara nyata dalam data operasional armada PT PLN Batam, di mana observasi lapangan mengungkap adanya kesenjangan mencolok antara jadwal teoretis dan realitas fisik. Sejumlah unit yang secara administratif telah mencapai batas waktu TBM, faktualnya secara visual dan parametrik masih menunjukkan integritas mekanikal yang prima. Kesenjangan ini menciptakan kebocoran nilai (value leakage) berupa biaya kapital yang tidak perlu, yang seharusnya dapat dimitigasi melalui strategi yang lebih adaptif [5].

Sebagai respons solutif terhadap limitasi TBM, strategi CBM menawarkan pendekatan yang lebih rasional dengan mendasarkan keputusan intervensi pada bukti objektif kondisi aset. Perkembangan pesat teknologi sensor dan algoritma pemrosesan data telah memungkinkan pemantauan parameter kritis, seperti temperatur gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), dan vibrasi, secara real-time [6]. Literatur terkini pun banyak menyoroti penggunaan Machine Learning dan Artificial Intelligence (AI) untuk memprediksi kegagalan mesin berdasarkan anomali data sensor tersebut. Studi oleh (Bunyan et al., 2025) dan riset sejenis mengonfirmasi bahwa CBM berbasis data numerik memiliki potensi besar untuk meningkatkan durabilitas komponen sekaligus menekan biaya operasional secara signifikan [7].

Kendati demikian, ketergantungan murni pada data sensor numerik menyisakan celah keterbatasan diagnostik. Sensor termodinamika dan vibrasi sering kali kurang sensitif terhadap inisiasi kerusakan fisik mikro, seperti retak termal awal atau korosi di bawah lapisan coating, yang belum memengaruhi performa makro mesin namun menyimpan potensi kegagalan katastropik. Di sinilah peran Borescope Inspection (BSI) menjadi instrumen yang tak tergantikan. BSI menyediakan data visual deterministik yang mampu memvalidasi integritas fisik komponen internal tanpa perlu melakukan pembongkaran [8]. Dengan

demikian, meskipun teknologi diagnostik digital terus berkembang, inspeksi visual tetap memegang otoritas tertinggi sebagai metode paling andal untuk mendeteksi cacat spesifik pada jalur gas panas (hot gas path) turbin gas [9].

Meskipun urgensi penerapan CBM telah diakui secara luas, tinjauan literatur sistematis mengungkapkan adanya kesenjangan metodologis yang signifikan, khususnya dalam penerapannya pada aset modular bernilai tinggi. Sebagian besar penelitian CBM cenderung berfokus pada pengembangan algoritma prediksi kerusakan (fault prognosis) atau optimasi jadwal teknis semata, namun jarang yang mengintegrasikan data visual kualitatif secara formal ke dalam algoritma keputusan ekonomi. Penelitian terdahulu umumnya hanya membandingkan TBM dan CBM menggunakan parameter biaya generik tanpa memperhitungkan mekanisme validasi keselamatan yang ketat.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada formulasi "Algoritma Gatekeeper", sebuah kerangka kerja yang secara eksplisit menempatkan hasil BSI sebagai validator biner dengan penentu akhir terhadap keputusan ekonomi. Berbeda dengan model probabilistik yang umum digunakan, pendekatan ini menawarkan kepastian teknis sebelum efisiensi ekonomi dieksekusi. Selain itu, penelitian ini menyajikan analisis tekno-ekonomi yang dihitung berdasarkan data riil operasional armada TM2500, membuktikan potensi penghematan spesifik sebesar USD 5,6 juta, yang memberikan validasi empiris kuat bagi operator pembangkit.

Penelitian ini dirancang untuk menjawab tantangan inefisiensi manajemen aset melalui pendekatan yang terintegrasi. Tujuan utamanya adalah menganalisis kelayakan teknis dan ekonomis dari transisi strategi pemeliharaan unit TM2500 dari basis waktu ke basis kondisi, dengan memanfaatkan parameter operasional aktual dan data inspeksi visual sebagai landasan empiris. Secara spesifik, penelitian ini bermaksud untuk merumuskan parameter operasional kritis yang berfungsi sebagai indikator awal dalam strategi CBM, serta memvalidasi peran Borescope Inspection (BSI) sebagai instrumen "Gatekeeper" utama dalam menentukan interval overhaul. Selanjutnya, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi kuantitatif terhadap dampak finansial penerapan strategi CBM tersebut, dengan mengukur besaran penghematan biaya langsung dan nilai manfaat ekonomi (Benefit-Cost Ratio) yang dihasilkan bagi perusahaan. Akhirnya, studi ini diarahkan untuk merekomendasikan model manajemen aset baru yang teruji secara empiris dan adaptif terhadap karakteristik operasional isolated grid.

II. LANDASAN TEORI

Penyusunan landasan teori ini bertujuan untuk membangun kerangka pemikiran dan landasan ilmiah yang kokoh dalam upaya merumuskan strategi pemeliharaan optimal bagi armada turbin gas TM2500. Bab ini menguraikan prinsip-prinsip fundamental, metodologi manajemen aset, serta parameter teknis yang menjadi acuan dalam pengambilan keputusan operasional di industri pembangkitan listrik.

Kajian literatur ini disusun secara sistematis menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk memetakan perkembangan teknologi dan tren strategi pemeliharaan dalam lanskap akademik. Melalui tinjauan ini, dilakukan perbandingan mendalam antara pendekatan konvensional Time-Based Maintenance (TBM) yang bersifat kaku dengan paradigma modern Condition-Based Maintenance (CBM) yang lebih adaptif dan berbasis data aktual.

Selain sebagai referensi teoretis, bagian ini difungsikan untuk mengidentifikasi kesenjangan penelitian (research gap) guna mempertegas posisi dan kebaruan tesis ini. Fokus utama kajian diarahkan pada integrasi validasi fisik melalui Borescope Inspection (BSI), pemantauan parameter termodinamika digital, serta evaluasi keekonomian melalui Cost Benefit Analysis (CBA). Dengan pemahaman komprehensif terhadap teori-teori pendukung tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan justifikasi teknis dan ekonomi yang kuat bagi PT PLN Batam dalam mengoptimalkan siklus hidup aset pembangkit modularnya secara berkelanjutan.

A. Sintesis Literatur dan Pemetaan Kesenjangan Penelitian

Kajian landasan teori dimulai dengan melakukan Systematic Literature Review (SLR) terhadap tujuh penelitian kunci untuk memetakan evolusi manajemen aset pembangkit. Secara teoretis, terdapat perdebatan antara dominasi Time-Based Maintenance (TBM) yang kaku dengan transisi menuju Condition-Based Maintenance (CBM) yang lebih adaptif. Kesenjangan penelitian (research gap) yang ditemukan adalah minimnya studi empiris yang mengintegrasikan data visual BSI dengan parameter termodinamika digital pada turbin gas modular yang tersebar di sistem isolated grid. Oleh karena itu, penelitian ini memposisikan diri untuk mengisi celah tersebut dengan menawarkan model evaluasi integratif yang menggabungkan validasi fisik dan analisis ekonomi makro.

B. Karakteristik Teknologi Turbin Gas Aero-derivatif TM2500

Unit TM2500 merupakan inovasi mesin termal berbasis teknologi aero-derivatif yang diadaptasi dari mesin jet pesawat CF6-80C2. Teknologi ini memiliki keunggulan pada rasio daya terhadap berat yang sangat tinggi, efisiensi termal superior antara 39% hingga 41%, serta kemampuan start-up yang sangat cepat yakni kurang dari 10 menit. Seluruh parameter operasional unit dikendalikan oleh sistem kontrol PLC RX3i berbasis Human-Machine Interface (HMI) yang memungkinkan pemantauan real-time terhadap kesehatan mesin. Dasar teknis ini memperkuat landasan untuk pengambilan keputusan pemeliharaan yang tidak lagi bergantung pada interval kalender semata, melainkan pada bukti operasional aktual.

C. Instrumen Monitoring Kondisi dan Validasi BSI

Fondasi utama strategi CBM pada unit TM2500 bertumpu pada empat instrumen Condition Monitoring (CM) yang presisi. Parameter kritis tersebut mencakup Temperatur Gas Buang (T48) untuk efisiensi pembakaran, Tekanan Discharge Kompresor (PS3) sebagai indikator

performa kompresi, Analisis Vibrasi untuk kestabilan mekanis, serta Equivalent Full Service Cycle (EFSC) untuk mengukur kelelahan termal akibat siklus start-stop. Di atas sensor digital tersebut, Borescope Inspection (BSI) diposisikan sebagai "Algoritma Gatekeeper" atau validator hierarki tertinggi karena kemampuannya mendeteksi kerusakan fisik mikroskopis yang tidak tertangkap oleh sensor suhu maupun tekanan. Hasil BSI memberikan dasar hukum dan teknis yang sah untuk menentukan status serviceable atau perpanjangan masa pakai unit.

D. Evaluasi Keekonomian melalui Cost Benefit Analysis (CBA)

Kelayakan transisi strategi pemeliharaan diuji secara kuantitatif menggunakan metode Cost Benefit Analysis (CBA). Metode ini membandingkan secara sistematis antara nilai manfaat berupa penghematan biaya kapital (Capex avoidance) dan pendapatan tambahan dengan biaya investasi sistem pemantauan. Dua indikator utama yang digunakan adalah Net Present Value (NPV) untuk menilai nilai bersih manfaat yang didiskontokan ke masa sekarang, serta Internal Rate of Return (IRR) untuk mengukur tingkat pengembalian investasi dibandingkan dengan biaya modal perusahaan. Analisis ini memberikan dimensi manajerial yang kuat bagi manajemen untuk menunda overhaul secara aman selama parameter operasional berada dalam rentang norma.

III. METODE PENELITIAN

A. Desain dan Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif terapan (applied quantitative research) dengan desain studi kasus ganda (multiple case studies). Metode ini dipilih untuk mengevaluasi efektivitas strategi pemeliharaan dalam konteks operasional nyata yang kompleks, di mana variabel teknis dan ekonomis saling berinteraksi. Objek penelitian adalah armada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) modular tipe TM2500 Gen4 SAC (Single Annular Combustor) milik PT PLN Batam. Populasi studi mencakup 20 unit turbin gas yang tersebar di sembilan lokasi strategis dengan karakteristik isolated grid, yaitu: Bangka, Belitung, Duri, Tarahan (Lampung), Pontianak, Suppa, Tello, Punagaya, dan Lombok. Pemilihan unit TM2500 sebagai objek studi didasarkan pada keseragaman teknologi (technological homogeneity) yang memungkinkan komparasi data antar-unit, serta variabilitas profil operasional (operational variability) yang tinggi, termasuk perbedaan beban dasar (base load) dan siklus peaker serta penggunaan bahan bakar ganda (dual fuel).

B. Prosedur Pengumpulan Data

Data penelitian dikumpulkan melalui dua pendekatan utama yang saling melengkapi, yaitu akuisisi data parameter operasional dan inspeksi visual teknis. Pertama, data parameter operasional diambil dari sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) dan Data Acquisition System (DAS) yang terintegrasi pada kontroler GE RX3i setiap unit. Variabel kunci yang direkam meliputi temperatur gas buang (T48) sebagai indikator efisiensi termal siklus Brayton dan kesehatan

komponen jalur gas panas, serta tekanan discharge kompresor (PS3) untuk memantau kinerja kompresi udara. Selain itu, data vibrasi (aksial dan radial) serta Total Running Hours (TRH) digunakan untuk mendeteksi ketidakseimbangan mekanis dan membandingkan posisi unit terhadap kurva degradasi teoretis OEM.

Kedua, pengumpulan data diperkuat dengan inspeksi visual teknis melalui Borescope Inspection (BSI), yang berfungsi sebagai komponen data primer paling kritical dalam kerangka "Gatekeeper". Laporan BSI diekstraksi dari rekam jejak pemeliharaan historis unit yang telah mencapai atau melampaui 12.500 jam operasi. Inspeksi ini dilaksanakan menggunakan video borescope industri beresolusi tinggi dengan kemampuan pengukuran stereo (stereo measurement). Data yang dianalisis mencakup citra visual kondisi combustion liner, fuel nozzle, high pressure turbine (HPT) blades, dan nozzle guide vanes, yang kemudian diklasifikasikan berdasarkan standar keparahan seperti coating loss, cracking, erosion, atau burning sesuai panduan GEK 112859

C. Analisis Tekno-Ekonomi (Cost-Benefit Analysis)

Analisis data dilakukan menggunakan metode Cost-Benefit Analysis (CBA) untuk mengukur kelayakan ekonomi dari transisi strategi TBM ke CBM. Model ekonomi dibangun dengan membandingkan nilai kini bersih atau Net Present Value (NPV) dari aliran kas biaya pemeliharaan antara skenario dasar (TBM) dan skenario usulan (CBM). Persamaan matematis untuk menghitung NPV didefinisikan sebagai berikut:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Di mana B_t merepresentasikan total manfaat (benefit) pada tahun ke- t , yang terdiri dari Cost Avoidance (biaya overhaul yang dihindari) dan Opportunity Revenue (pendapatan operasi tambahan). Variabel C_t adalah total biaya (cost) pada tahun ke- t yang mencakup biaya inspeksi BSI dan monitoring, r adalah tingkat diskonto, dan N adalah periode analisis. Selain itu, kelayakan investasi juga diuji menggunakan Internal Rate of Return (IRR), yaitu tingkat diskonto yang membuat NPV bernilai nol.

$$0 = \sum_{t=0}^N \frac{(B_t - C_t)}{(1+IRR)^t} \quad (2)$$

Sebagai indikator efisiensi investasi akhir, rasio manfaat terhadap biaya atau Benefit-Cost Ratio (BCR) dihitung menggunakan persamaan:

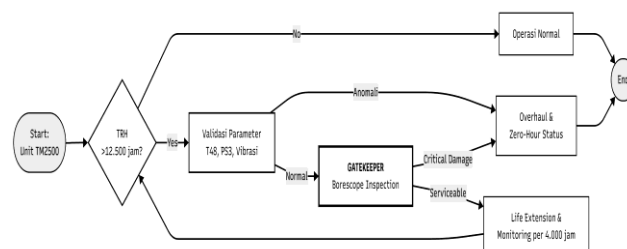
$$BCR = \frac{\sum PV(Benefit)}{\sum PV(Cost)} \quad (3)$$

Strategi CBM dinyatakan layak secara ekonomis apabila hasil perhitungan menunjukkan $NPV > 0$, $IRR > \text{Cost of Capital}$, dan $BCR > 1$

D. Kerangka Kerja Kebaruan: Algoritma "Gatekeeper"

Untuk menjembatani kesenjangan antara efisiensi ekonomi dan keamanan teknis, penelitian ini memperkenalkan "Algoritma Gatekeeper". Algoritma ini

dirancang untuk memitigasi risiko teknis yang melekat pada transisi strategi CBM dengan menempatkan inspeksi visual sebagai validator mutlak. Logika pengambilan keputusan ini beroperasi secara hierarkis dan deterministik melalui tiga fase validasi bertingkat, sebagaimana dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Kerangka Kerja Algoritma Gatekeeper

Seperti terlihat pada alur diagram, proses evaluasi berjalan melalui mekanisme validasi bertingkat (multi-stage validation). Proses dimulai dengan pemicu administratif (administrative trigger) ketika unit mencapai ambang batas TRH > 12.500 jam. Pada tahap ini, sistem tidak langsung mengeksekusi overhaul fisik, melainkan menginisiasi protokol evaluasi.

Tahap filtrasi pertama adalah validasi parameter termodinamika. Data operasional kritis (T48, PS3, dan vibrasi) dianalisis untuk mendeteksi anomali makro. Jika indikasi abnormal terdeteksi pada tahap ini, unit langsung diarahkan menuju jalur Overhaul & Reset Interval. Namun, apabila parameter operasional menunjukkan performa normal, unit berhak memasuki tahap validasi utama atau "The Gatekeeper" melalui Borescope Inspection (BSI).

Pada tahap ini, hasil inspeksi visual menjadi penentu mutlak terhadap keputusan manajerial. Temuan visual berupa kerusakan kritis (Critical Damage) akan secara otomatis membatalkan pertimbangan efisiensi ekonomi dan mewajibkan pelaksanaan Overhaul. Sebaliknya, validasi visual yang mengonfirmasi status Serviceable akan membuka jalur menuju fase Life Extension. Dalam fase operasi lanjutan ini, unit diizinkan beroperasi dengan protokol pemantauan intensif setiap interval 4.000 jam, menciptakan siklus pengamanan aset yang berkelanjutan dan terukur.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Profil Operasional dan Karakterisasi Degradasi Aset pada Sistem Modular

Langkah pertama dalam mereformasi strategi manajemen aset adalah memahami secara rinci profil operasional dari populasi mesin yang dikelola. Turbin gas aero-derivatif seperti TM2500 memiliki karakteristik responsif yang unik, di mana laju degradasi komponen hot section sangat sensitif terhadap modus operasi, apakah unit beroperasi sebagai pemikul beban dasar (base load) yang stabil atau sebagai unit pemikul beban puncak (peaker) yang mengalami siklus termal ekstrem.

B. Analisis Distribusi Beban dan Variabilitas Operasional Lintas Lokasi

Berdasarkan data operasional dari 20 unit TM2500 yang berlokasi di sembilan Mobile Power Plant (MPP) PT

PLN Batam, terlihat adanya variasi tingkat penggunaan yang signifikan. Data per 1–3 Mei 2025 menunjukkan perbedaan beban operasi antar unit yang dipengaruhi oleh kebutuhan daya di setiap sistem kelistrikan lokal. Tabel 1 di bawah ini menyajikan ringkasan statistik Total Running

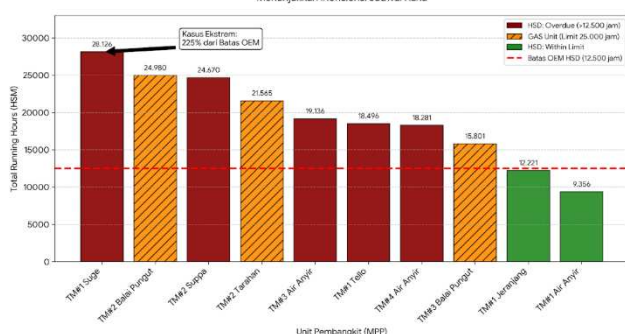
Hours (TRH) untuk tiga modul utama: Kompresor, Hot Section Module (HSM), dan Power Turbine (PT), serta parameter Engine Fuel Start Counter (EFSC) yang menjadi indikator frekuensi siklus termal.

Tabel 1
Rekapitulasi Data Operasional Aktual Unit TM2500 PLN Batam

No	Lokasi	Unit ID	TRH Kompresor (Jam)	TRH HSM (Jam)	TRH PT (Jam)	EFSC (Kali)	Bahan Bakar	Status vs TBM (12.500 Jam)
1	PLTG MPP Tello	TM#1	47.651,33	18.495,90	47.651,33	269	HSD	Overdue (+48%)
2	PLTG MPP Tello	TM#2	31.335,03	3.756,49	31.335,03	1.739	HSD	Under
3	PLTG MPP Jeranjang	TM#1	29.246,00	12.221,00	29.246,00	1.981	HSD	Borderline
4	PLTG MPP Jeranjang	TM#2	36.909,00	2.618,00	36.909,00	1.939	HSD	Under
5	PLTG MPP Air Anyir	TM#1	31.390,91	9.356,46	50.406,89	1.359	HSD	Under
6	PLTG MPP Air Anyir	TM#2	48.712,46	1.619,83	48.712,46	1.114	HSD	Under
7	PLTG MPP Air Anyir	TM#3	30.198,90	19.135,71	30.198,90	1.599	HSD	Overdue (+53%)
8	PLTG MPP Air Anyir	TM#4	33.949,31	18.280,90	33.949,31	1.734	HSD	Overdue (+46%)
9	PLTG MPP Tarahan	TM#2	58.601,75	21.565,46	58.601,75	2.175	GAS	Overdue (+72%)
10	PLTG MPP Suge	TM#1	44.130,06	28.126,19	44.130,06	1.054	HSD	Overdue (+125%)

Analisis mendalam terhadap Tabel diatas mengungkap fenomena "Ketidakseimbangan Laten" dalam manajemen armada. Secara spesifik, terdapat unit-unit ekstrim seperti TM#2 di MPP Tarahan yang mencatat TRH HSM sebesar 21.565,46 jam dan TM#1 di MPP Suge dengan TRH HSM mencapai 28.126,19 jam. Unit TM#1 Suge menjadi anomali data yang paling menarik karena mampu mempertahankan status operasional (serviceable) dengan bahan bakar HSD meskipun telah beroperasi dua kali lipat dari umur desain teoritis hot section-nya. Angka ini secara drastis melampaui ambang batas rekomendasi Time-Based Maintenance (TBM) standar yang dikeluarkan oleh OEM General Electric, yaitu 12.500 jam untuk unit berbahan bakar cair (HSD) dan 25.000 jam untuk unit gas.

Perbandingan Jam Operasi Aktual vs Batas Pabrikan (TBM)
Menunjukkan Inefisiensi Jadwal Kaku



Gambar 2. Perbandingan Jam Operasi Aktual vs Batas Pabrikan (TBM)

Dalam paradigma manajemen aset konvensional, unit-unit dengan status Overdue di atas 50% hingga 125%

ini akan dikategorikan sebagai aset dengan risiko kegagalan tinggi (high-risk assets). Secara administratif, kondisi ini sering kali memicu perintah pemeliharaan paksa atau forced outage untuk penggantian modul, tanpa memandang kondisi fisik aktual mesin. Namun, data lapangan menunjukkan bahwa unit-unit tersebut masih mampu beroperasi (serviceable) dan menyuplai daya ke jaringan. Hal ini mengindikasikan bahwa asumsi laju degradasi linier yang menjadi landasan TBM tidak berlaku secara universal pada seluruh populasi mesin TM2500. Faktor-faktor eksternal seperti stabilitas beban operasi (load stability) dan kualitas pemeliharaan preventif rutin (pencucian kompresor, kualitas filtrasi udara/bahan bakar) memberikan kontribusi signifikan yang memperlambat laju keausan, menciptakan sisa usia pakai (Remaining Useful Life/RUL) yang belum tereksploitasi oleh strategi TBM.

Sebaliknya, unit-unit di MPP Parit Baru (TM#1 hingga TM#4) menunjukkan karakteristik yang sangat berbeda, dengan TRH HSM yang masih sangat rendah (<5.000 jam) dan nilai EFSC di bawah 600. Disparitas ini menegaskan bahwa penerapan satu aturan interval overhaul yang seragam (misalnya hard limit 12.500 jam) untuk seluruh armada adalah tindakan yang tidak efisien secara sistemik. Unit dengan beban ringan atau jam operasi rendah dipaksa masuk dalam antrian perencanaan pemeliharaan jangka panjang yang kaku, sementara unit dengan beban berat namun stabil mungkin memiliki potensi ekonomi yang terbuang jika dipaksa berhenti terlalu dini.

Disparitas profil operasi semakin terlihat ketika membandingkan akumulasi jam operasi (TRH) dengan

frekuensi siklus termal yang direpresentasikan oleh Engine Fuel Start Counter (EFSC). Siklus termal (thermal cycling) merupakan mekanisme utama pemicu kerusakan Low Cycle Fatigue (LCF), yang menyebabkan inisiasi retak mikro pada material superalloy akibat ekspansi dan kontraksi termal berulang saat proses start-up dan shutdown. Unit TM#2 di MPP Tarahan menyajikan kasus studi yang unik. Unit ini memiliki TRH PT tertinggi dalam populasi (58.601 jam) dan juga EFSC yang sangat tinggi (2.175 kali start). Secara teoretis, kombinasi jam operasi panjang (mekanisme creep) dan siklus tinggi (mekanisme fatigue) seharusnya menempatkan unit ini pada risiko kegagalan material yang ekstrem. Namun, keberhasilan unit ini beroperasi hingga mendekati batas 25.000 jam tanpa kegagalan katastrofik mengindikasikan efektivitas bahan bakar gas dalam memitigasi thermal stress melalui profil temperatur ruang bakar yang lebih seragam dibandingkan HSD. Sebaliknya, Unit TM#1 di MPP Jeranjang (HSD) dengan EFSC 1.981 meski baru mencapai TRH HSM 12.221 jam berada dalam kondisi borderline, di mana tingginya frekuensi start menempatkan unit ini pada risiko degradasi yang setara atau bahkan lebih tinggi dibanding unit gas dengan jam operasi dua kali lipatnya.

Temuan ini diperkuat oleh analisis dampak jenis bahan bakar terhadap laju degradasi komponen. Sebagian besar armada TM2500 PLN Batam (Tello, Air Anyir, Jeranjang, Suge, dll.) menggunakan HSD sebagai bahan bakar primer. HSD, meskipun memiliki densitas energi tinggi, mengandung komponen sulfur dan partikulat yang dapat memicu korosi panas (hot corrosion) dan erosi pada sudu turbin serta penyumbatan pada fuel nozzle.

Data lapangan menunjukkan bahwa unit berbahan bakar HSD cenderung mengalami pembentukan deposit karbon (carbon build-up) yang lebih cepat pada fuel nozzle dan combustor swirler. Deposit ini mendistorsi pola semprotan bahan bakar (fuel spray pattern), yang kemudian menciptakan lidah api yang tidak terarah (flame impingement) pada dinding liner. Kondisi ini mempercepat degradasi lokal meskipun parameter operasi makro (seperti T48 rata-rata) terlihat normal. Oleh karena itu, interval inspeksi visual untuk unit HSD harus diperlakukan lebih ketat dibandingkan unit Gas, namun keputusan penggantian modul tetap harus didasarkan pada kondisi fisik aktual, bukan sekadar hitungan jam. Temuan ini menjadi landasan logis bagi penerapan "Algoritma Gatekeeper" yang mampu membedakan respon pemeliharaan berdasarkan bukti fisik visual.

C. Validasi Teknis Melalui Inspeksi Visual: Mekanisme Algoritma Gatekeeper

Transformasi strategi Condition-Based Maintenance (CBM) dalam penelitian ini bertumpu pada konstruksi "Algoritma Gatekeeper", sebuah mekanisme pengambilan keputusan deterministik yang menempatkan data Borescope Inspection (BSI) sebagai penentu akhir terhadap parameter operasi numerik. Pendekatan ini didasarkan pada premis bahwa sensor termodinamika inferensial sering kali memiliki keterbatasan dalam mendeteksi inisiasi kerusakan fisik mikro, sehingga bukti forensik langsung mengenai integritas metalurgi komponen menjadi instrumen yang tak tergantikan.

Mekanisme operasional algoritma ini dirancang secara hierarkis untuk memitigasi risiko teknis selama transisi dari strategi Time-Based Maintenance (TBM). Berbeda dengan pendekatan konvensional di mana pencapaian ambang batas administratif Total Running Hours (TRH) sebesar 12.500 jam memicu eksekusi overhaul otomatis, algoritma ini menggunakan batas tersebut hanya sebagai pemicu awal (initial trigger) untuk menginisiasi protokol evaluasi bertingkat. Proses evaluasi dimulai dengan filtrasi tahap pertama melalui analisis tren parameter termodinamika (T48, PS3, dan vibrasi). Apabila parameter tersebut normal, unit akan memasuki tahap validasi utama melalui BSI yang berfungsi sebagai "Gatekeeper". Pada tahap ini, kriteria evaluasi mengacu pada standar keberterimaan OEM (GEK 112859) untuk menghasilkan keputusan biner: temuan kerusakan kritis akan memicu status "NO-GO" yang mewajibkan overhaul segera, sedangkan konfirmasi kondisi serviceable akan menghasilkan status "GO" yang mengizinkan eksekusi Life Extension dengan protokol pemantauan yang diperketat.

Validitas algoritma ini teruji secara empiris melalui evaluasi kasus ekstrem pada Unit TM#1 di MPP Suge. Unit ini mencatat rekor TRH Hot Section Module (HSM) sebesar 28.126 jam, atau melampaui batas rekomendasi TBM (12.500 jam) sebesar 125%. Dalam pemeliharaan konvensional, unit berbahan bakar HSD ini seharusnya sudah menjalani dua kali siklus overhaul. Namun, pelaksanaan BSI mengungkapkan fakta kontradiktif di mana integritas komponen utama masih terjaga dengan baik. Hasil inspeksi menunjukkan bahwa lapisan Thermal Barrier Coating (TBC) pada Combustion Liner masih utuh di atas 90% dengan erosi minor pada mixing holes tanpa adanya retakan pada logam induk. Selain itu, HPT Stage 1 Nozzle hanya mengalami oksidasi ringan pada leading edge dengan lubang pendingin yang terbuka penuh, serta tidak ditemukan tanda-tanda creep, rubbing, atau kehilangan tip cap pada HPT Blades. Berdasarkan bukti visual tersebut, Algoritma Gatekeeper mengklasifikasikan unit sebagai serviceable, yang membuktikan bahwa ketergantungan kaku pada TBM sering kali memicu alarm palsu yang berujung pada pemborosan biaya kapital pada aset yang sejatinya masih produktif.

Sebaliknya, efektivitas algoritma dalam mendeteksi degradasi prematur atau False Negative tervalidasi melalui analisis pada Unit TM#1 di MPP Jeranjang. Unit ini memiliki akumulasi TRH HSM sebesar 12.221 jam, yang secara administratif masih berada di bawah ambang batas TBM sehingga dikategorikan aman. Namun, evaluasi CBM yang dipicu oleh profil operasi berat unit tersebut mengungkap kondisi kritis yang tersembunyi. Inspeksi visual mendeteksi adanya distorsi parah pada fuel nozzle akibat penumpukan karbon (coking), serta retakan termal sepanjang 5 cm pada inner liner yang mendekati zona kritis. Kerusakan ini diidentifikasi bersumber dari pembakaran tidak sempurna akibat penyumbatan nozzle yang menciptakan titik panas lokal (hot spots). Dalam kasus ini, Algoritma Gatekeeper segera mengeluarkan sinyal "NO-GO", mencegah risiko perambatan retakan yang dapat menyebabkan lepasnya material logam (liberation) dan kerusakan katastrofik. Temuan ini menegaskan bahwa strategi CBM tidak hanya berorientasi

pada efisiensi, tetapi juga memperkuat fungsi keselamatan aset dengan mendeteksi risiko yang luput dari pengawasan berbasis waktu.

Secara keseluruhan, studi kasus tersebut mengukuhkan posisi BSI sebagai penentu akhir deterministik dalam manajemen aset turbin gas. Mengingat sensor parameter operasi sering kali gagal mendeteksi inisiasi kerusakan fisik seperti retak mikro, Algoritma Gatekeeper didesain dengan logika hierarkis di mana hasil inspeksi visual memiliki otoritas tertinggi. Dengan demikian, keputusan ekonomi untuk menunda overhaul demi efisiensi biaya hanya dapat dieksekusi jika, dan hanya jika, validasi visual memberikan konfirmasi keamanan. Mekanisme ini menciptakan lapisan keamanan ganda (redundancy) yang lebih superior dibandingkan strategi TBM tradisional maupun CBM yang hanya berbasis sensor numerik semata.

D. Evaluasi Parameter Termodinamika dan Korelasi Multivariat

Meskipun BSI memegang peran penentu akhir, pemantauan parameter termodinamika secara kontinu melalui sistem SCADA tetap menjadi lini pertahanan pertama (first line of defense). Analisis korelasi multivariat antara variabel proses, khususnya Temperatur Gas Buang (T48), Tekanan Discharge Kompresor (PS3), dan Vibrasi, terbukti mampu memberikan wawasan real-time mengenai kesehatan mesin dan berfungsi sebagai indikator awal (leading indicator) yang presisi. Berdasarkan evaluasi data operasional, parameter T48 Spread (selisih temperatur antara termokopel tertinggi dan terendah) menunjukkan sensitivitas diagnostik yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai rata-rata T48 absolut dalam mendeteksi anomali pembakaran. Hal ini terlihat jelas pada perbandingan karakteristik operasi antara Unit TM#2 di MPP Tarahan dan Unit TM#1 di MPP Jeranjang. Pada unit TM#2 Tarahan, nilai T48 Spread terpantau stabil di bawah 30°F, yang konsisten dengan temuan BSI yang menunjukkan kondisi ruang bakar bersih. Sebaliknya, pada unit TM#1 Jeranjang, peningkatan volatilitas T48 Spread berkorelasi langsung dengan distorsi pola pembakaran yang disebabkan oleh penyumbatan fuel nozzle. Oleh karena itu, tren kenaikan spread ini direkomendasikan sebagai pemicu otomatis untuk menjadwalkan inspeksi visual lebih awal, mendahului jadwal rutin.

Selain indikator suhu, analisis terhadap efisiensi isentropik kompresor melalui parameter PS3 mengungkapkan dampak sistemik yang signifikan terhadap umur komponen hot section. Observasi pada Unit TM#1 di MPP Air Anyir menunjukkan adanya korelasi negatif yang kuat antara penurunan PS3 dengan kenaikan T48. Fenomena ini terjadi karena penurunan tekanan discharge akibat fouling pada kompresor akan direspons oleh sistem kontrol dengan meningkatkan laju aliran bahan bakar untuk mempertahankan output daya. Kompensasi ini secara tidak langsung menaikkan Firing Temperature, yang berdampak pada pengurangan umur creep sudu turbin secara eksponensial. Temuan ini menggarisbawahi bahwa menjaga performa PS3 melalui tindakan pemeliharaan sederhana seperti water wash rutin bukan hanya soal efisiensi bahan bakar, tetapi merupakan strategi vital untuk memitigasi degradasi material turbin akibat beban termal berlebih.

Terakhir, analisis vibrasi melengkapi evaluasi termodinamika sebagai indikator utama integritas mekanikal. Studi kasus pada Unit TM#2 di MPP Suppa, yang memiliki TRH HSM sebesar 24.669 jam, menunjukkan tren kenaikan vibrasi aksial yang mendekati batas alarm pabrikan sebesar 3 mm/s. Melalui analisis spektrum, sumber vibrasi teridentifikasi berasal dari ketidakseimbangan rotor akibat erosi yang tidak merata pada LPT Blades. Deteksi dini melalui tren data vibrasi ini memungkinkan tim pemeliharaan untuk melakukan tindakan korektif terukur berupa field balancing, sehingga risiko kerusakan merambat ke komponen bantalan (bearing) dapat dicegah. Integrasi ketiga parameter ini (T48 Spread, PS3, dan Vibrasi) membentuk sebuah matriks diagnostik yang komprehensif, memungkinkan operator untuk mendeteksi gejala degradasi dari sisi termal, efisiensi aliran, hingga stabilitas mekanis sebelum kerusakan fisik yang parah terjadi.

E. Evaluasi Parameter Termodinamika dan Korelasi Multivariat

Meskipun BSI memegang peran penentu akhir, pemantauan parameter termodinamika secara kontinu melalui sistem SCADA tetap menjadi lini pertahanan pertama (first line of defense). Analisis korelasi multivariat antara variabel proses, khususnya Temperatur Gas Buang (T48), Tekanan Discharge Kompresor (PS3), dan Vibrasi, terbukti mampu memberikan wawasan real-time mengenai kesehatan mesin dan berfungsi sebagai indikator awal (leading indicator) yang presisi. Berdasarkan evaluasi data operasional, parameter T48 Spread (selisih temperatur antara termokopel tertinggi dan terendah) menunjukkan sensitivitas diagnostik yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai rata-rata T48 absolut dalam mendeteksi anomali pembakaran. Hal ini terlihat jelas pada perbandingan karakteristik operasi antara Unit TM#2 di MPP Tarahan dan Unit TM#1 di MPP Jeranjang. Pada unit TM#2 Tarahan, nilai T48 Spread terpantau stabil di bawah 30°F, yang konsisten dengan temuan BSI yang menunjukkan kondisi ruang bakar bersih. Sebaliknya, pada unit TM#1 Jeranjang, peningkatan volatilitas T48 Spread berkorelasi langsung dengan distorsi pola pembakaran yang disebabkan oleh penyumbatan fuel nozzle. Oleh karena itu, tren kenaikan spread ini direkomendasikan sebagai pemicu otomatis untuk menjadwalkan inspeksi visual lebih awal, mendahului jadwal rutin.

Selain indikator suhu, analisis terhadap efisiensi isentropik kompresor melalui parameter PS3 mengungkapkan dampak sistemik yang signifikan terhadap umur komponen hot section. Observasi pada Unit TM#1 di MPP Air Anyir menunjukkan adanya korelasi negatif yang kuat antara penurunan PS3 dengan kenaikan T48. Fenomena ini terjadi karena penurunan tekanan discharge akibat fouling pada kompresor akan direspons oleh sistem kontrol dengan meningkatkan laju aliran bahan bakar untuk mempertahankan output daya. Kompensasi ini secara tidak langsung menaikkan Firing Temperature, yang berdampak pada pengurangan umur creep sudu turbin secara eksponensial. Temuan ini menggarisbawahi bahwa menjaga performa PS3 melalui tindakan pemeliharaan sederhana seperti water wash rutin bukan hanya soal efisiensi bahan bakar, tetapi merupakan strategi vital untuk

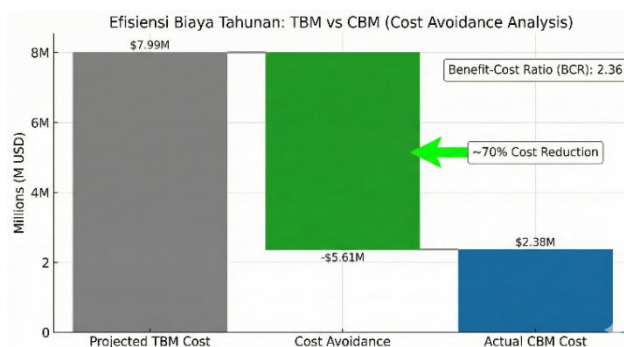
memitigasi degradasi material turbin akibat beban termal berlebih.

Terakhir, analisis vibrasi melengkapi evaluasi termodinamika sebagai indikator utama integritas mekanikal. Studi kasus pada Unit TM#2 di MPP Suppa, yang memiliki TRH HSM sebesar 24.669 jam, menunjukkan tren kenaikan vibrasi aksial yang mendekati batas alarm pabrikan sebesar 3 mm/s. Melalui analisis spektrum, sumber vibrasi teridentifikasi berasal dari ketidakseimbangan rotor akibat erosi yang tidak merata pada LPT Blades. Deteksi dini melalui tren data vibrasi ini memungkinkan tim pemeliharaan untuk melakukan tindakan korektif terukur berupa field balancing, sehingga risiko kerusakan merambat ke komponen bantalan (bearing) dapat dicegah. Integrasi ketiga parameter ini (T48 Spread, PS3, dan Vibrasi) membentuk sebuah matriks diagnostik yang komprehensif, memungkinkan operator untuk mendeteksi gejala degradasi dari sisi termal, efisiensi aliran, hingga stabilitas mekanis sebelum kerusakan fisik yang parah terjadi.

F. Evaluasi Tekno-Ekonomi (Cost-Benefit Analysis)

Validasi teknis strategi CBM mutlak memerlukan justifikasi finansial yang konkret sebagai dasar pengambilan keputusan strategis perusahaan. Dalam kerangka ini, metode Cost-Benefit Analysis (CBA) diterapkan untuk mengkomparasi secara kuantitatif antara skenario Baseline (TBM) dan skenario Proposed (CBM Gatekeeper). Analisis ekonomi ini dibangun di atas komponen biaya riil yang berlaku di PT PLN Batam serta standar industri pembangkitan, di mana struktur biayanya terbagi menjadi tiga elemen utama. Pertama, Biaya Overhaul atau Hot Section Replacement (HSR) yang diestimasi rata-rata sebesar USD 2.500.000 per kejadian, mencakup material (spare parts), jasa tenaga ahli OEM, dan logistik mobilisasi. Kedua, Biaya Inspeksi CBM yang meliputi kegiatan BSI, analisis data, dan peralatan diperhitungkan sebesar USD 50.000 per inspeksi. Ketiga, model ini juga menginternalisasi Biaya Downtime atau potensi kerugian pendapatan akibat mesin tidak beroperasi, yang dikalkulasi berdasarkan kapasitas unit rata-rata 25 MW, faktor kapasitas, dan harga jual listrik yang berlaku, dengan periode analisis mencakup data realisasi tahun 2024 hingga proyeksi 5–9 tahun ke depan.

Selanjutnya, kuantifikasi manfaat ekonomi difokuskan pada perhitungan nilai Cost Avoidance dan Opportunity Revenue. Berdasarkan simulasi komparatif, skenario TBM memproyeksikan total biaya pemeliharaan tahunan dapat mencapai USD 7.994.431 apabila seluruh unit yang mencapai batas 12.500 jam dipaksa menjalani overhaul. Angka ini merefleksikan inefisiensi dari pendekatan konservatif yang mengganti komponen berdasarkan jadwal semata, terlepas dari kondisi aktualnya. Sebaliknya, realisasi aktual tahun 2024 dengan penerapan CBM mencatatkan biaya pemeliharaan yang jauh lebih rendah, yakni hanya sebesar USD 2.380.000. Efisiensi signifikan ini dicapai melalui strategi penundaan overhaul pada unit-unit yang terbukti sehat dan pembatasan intervensi hanya pada unit yang benar-benar membutuhkan. Dengan demikian, nilai penghematan biaya langsung (Direct Cost Avoidance) yang diperoleh perusahaan dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3. Perbandingan Proyeksi TBM vs Realisasi CBM Menunjukkan Reduksi Biaya ~70%

Seperti yang diilustrasikan pada gambar di atas, strategi CBM berhasil memangkas beban operasional secara drastis dengan nilai penghematan biaya langsung (Direct Cost Avoidance) sebesar USD 5.614.431 per tahun atau setara dengan penurunan biaya sekitar 70%.

Di samping penghematan biaya langsung, strategi ini juga memberikan manfaat tambahan berupa Opportunity Revenue dari penundaan downtime. Apabila sebuah unit TM2500 berkapasitas 25 MW mampu menunda overhaul selama satu tahun (setara ±8.000 jam operasi) dan menghindari durasi downtime standar selama satu bulan (720 jam), maka strategi CBM secara efektif menghindarkan perusahaan dari risiko kehilangan produksi (production loss), yang pada akhirnya berdampak positif signifikan terhadap ketersediaan unit (availability).

Untuk mengukur efisiensi alokasi modal secara lebih presisi, evaluasi profitabilitas dilakukan dengan menggunakan indikator rasio manfaat terhadap biaya (Benefit-Cost Ratio). Dengan menggunakan asumsi bahwa biaya implementasi CBM adalah total biaya pemeliharaan aktual yang dikeluarkan (USD 2,38 juta) sedangkan manfaatnya adalah total biaya TBM yang berhasil dihindari (USD 7,99 juta), maka perhitungan BCR adalah sebagai berikut:

$$BCR = \frac{\text{Total Manfaat (Penghematan + Pendapatan)}}{\text{Total Biaya Implementasi CBM}} \quad (4)$$

$$BCR \approx \frac{5.614.431}{2.380.000} \approx 2,36$$

Nilai BCR sebesar 2,36 ini mengindikasikan bahwa setiap satu dolar yang diinvestasikan dalam strategi CBM mampu menghasilkan manfaat pengembalian lebih dari dua kali lipat. Kelayakan investasi jangka panjang ini semakin diperkuat oleh proyeksi Net Present Value (NPV) yang bernilai positif masif selama horizon waktu 5–9 tahun, serta tingkat Internal Rate of Return (IRR) yang tercatat jauh melampaui biaya modal (Cost of Capital) perusahaan. Fakta-fakta finansial ini mengonfirmasi bahwa transisi ke CBM bukan sekadar langkah efisiensi operasional semata, melainkan merupakan keputusan investasi strategis yang sangat menguntungkan (highly profitable).

Terakhir, sebagai langkah preventif dalam memitigasi risiko finansial, dilakukan analisis sensitivitas untuk menguji ketahanan model ekonomi terhadap dinamika

variabel eksternal. Hasil analisis menunjukkan bahwa model ini memiliki resistensi yang baik; apabila harga suku cadang hot section mengalami kenaikan (misalnya sebesar 20% akibat inflasi global) nilai penghematan dari CBM (Cost Avoidance) justru akan semakin besar, yang secara linear akan meningkatkan NPV proyek. Adapun risiko terbesar dari penerapan CBM adalah potensi kegagalan tak terduga (uncaptured failure) yang dapat menyebabkan kerusakan parah. Namun demikian, dengan adanya buffer penghematan tahunan sebesar USD 5,6 juta, perusahaan memiliki cadangan dana yang lebih dari cukup untuk menutupi risiko satu kali kejadian corrective maintenance yang biayanya diestimasi berkisar antara USD 500.000 hingga USD 1.000.000. Hal ini membuktikan bahwa strategi CBM memiliki margin keamanan finansial yang tebal untuk menyerap risiko, sementara mekanisme Gatekeeper bekerja secara simultan untuk meminimalkan probabilitas terjadinya kegagalan teknis tersebut.

G. Implikasi Strategis dan Kebaruan

Secara teoritis, hasil penelitian ini mendukung pergeseran paradigma dari pendekatan "Safe-Life" (mengganti komponen sebelum potensi kerusakan muncul berdasarkan statistik populasi) menuju pendekatan "Damage-Tolerance" (mengoperasikan komponen selama kerusakan yang ada masih di bawah batas kritis yang terukur dan terpantau). Dalam industri penerbangan, konsep ini sudah lama diterapkan. Penerapannya pada turbin gas industri di sistem isolated grid membuktikan bahwa komponen modern (superalloys) memiliki toleransi kerusakan dan durabilitas yang jauh melampaui estimasi konservatif manual perawatan lama, asalkan dipantau dengan instrumen yang tepat (BSI).

Dalam konteks makro-strategis, khususnya bagi Indonesia sebagai negara kepulauan dengan ratusan sistem isolated grid, implikasi dari temuan ini sangatlah krusial. Unit pembangkit modular seperti TM2500 merupakan tulang punggung kelistrikan di luar sistem Jawa-Bali, sehingga efisiensi pengelolaan aset ini memiliki dampak langsung terhadap struktur Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik daerah. Kemampuan untuk memperpanjang interval operasi secara aman melalui strategi CBM tidak hanya menawarkan efisiensi fiskal, tetapi juga memberikan dampak strategis berupa pengurangan ketergantungan pada impor suku cadang dan peningkatan kemandirian energi nasional. Dengan demikian, penerapan strategi ini memungkinkan operator untuk menjaga stabilitas pasokan listrik di daerah terpencil secara berkelanjutan tanpa membebani keuangan negara dengan belanja modal (Capital Expenditure) yang tidak diperlukan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa integrasi "Algoritma Gatekeeper" dalam strategi pemeliharaan turbin gas TM2500 menawarkan solusi komprehensif atas inefisiensi yang melekat pada pendekatan berbasis waktu (Time-Based Maintenance). Secara teknis, penggunaan Borescope Inspection (BSI) sebagai validator deterministik terbukti efektif memitigasi risiko operasional, baik dengan mencegah overhaul prematur pada unit sehat (False Positive) maupun mendeteksi degradasi dini pada unit

berisiko (True Negative). Data empiris menunjukkan bahwa integritas mekanikal mesin tidak berkorelasi linier dengan jam operasi, sehingga validasi visual menjadi instrumen mutlak untuk menjamin keamanan aset dalam fase perpanjangan masa pakai (life extension).

Dari perspektif ekonomi, transformasi menuju Condition-Based Maintenance (CBM) terbukti memberikan dampak fiskal yang superior. Analisis CBA mengonfirmasi potensi penghematan biaya langsung (direct cost avoidance) sebesar USD 5.614.431 per tahun, dengan rasio kelayakan BCR mencapai 2,36. Temuan ini menegaskan bahwa strategi CBM bukan sekadar inisiatif efisiensi teknis, melainkan instrumen manajemen aset strategis yang mampu membebaskan kapital perusahaan dari beban pemeliharaan yang tidak perlu, sekaligus meningkatkan ketersediaan (availability) pasokan listrik di sistem isolated grid.

Berdasarkan temuan tersebut, disarankan bagi manajemen PT PLN Batam untuk memformalkan Algoritma Gatekeeper ke dalam Standard Operating Procedure (SOP) perusahaan, menjadikan validasi visual sebagai prasyarat wajib sebelum eksekusi overhaul. Sebagian dari penghematan biaya yang dihasilkan direkomendasikan untuk direinvestasi pada modernisasi infrastruktur diagnostik, seperti adopsi teknologi remote monitoring berbasis AI guna meningkatkan presisi deteksi dini. Bagi penelitian selanjutnya, pengembangan model prediktif yang mengintegrasikan Deep Learning untuk analisis citra kerusakan borescope secara otomatis akan menjadi langkah maju dalam mengurangi subjektivitas inspeksi manusia dan menyempurnakan akurasi keputusan Gatekeeper.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan setinggi-tingginya kepada Prof. Ir. Syamsir Abduh, M.M., Ph.D., IPU., ASEAN.Eng dan Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. atas bimbingan, arahan, serta masukan berharga selama proses penyusunan riset ini. Terima kasih juga diucapkan kepada PT PLN Batam (Unit Bisnis Bright Energy Service) atas dukungan data operasional dan izin yang diberikan, serta kepada rekan-rekan di bagian MPP Tersebar yang telah membuka ruang diskusi selama penelitian berlangsung

REFERENSI

- [1] N. Firdaus, H. Ab-Samat, and B. T. Prasetyo, "Maintenance strategies and energy efficiency: a review," *J Qual Maint Eng*, vol. 29, no. 3, pp. 640–665, Jul. 2023, doi: 10.1108/JQME-06-2021-0046.
- [2] R. Umyshev, E. V. Osipov, A. A. Kibarin, M. S. Korobkov, T. V. Khodanova, and Z. S. Duisenbek, "Techno-Economic Analysis of the Modernization Options of a Gas Turbine Power Plant Using Aspen HYSYS," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 6, p. 2704, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062704.
- [3] Quatrini, F. Costantino, G. Di Gravio, and R. Patriarca, "Condition-Based Maintenance—An Extensive Literature Review," *Machines*, vol. 8, no. 2, p. 31, Jun. 2020, doi: 10.3390/machines8020031.
- [4] B. de Jonge, R. Teunter, and T. Tinga, "The influence of practical factors on the benefits of condition-based maintenance over time-based maintenance," *Reliab Eng*

- Syst Saf, vol. 158, pp. 21–30, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.res.s.2016.10.002.
- [5] M. M. Hamasha et al., “Strategical selection of maintenance type under different conditions,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 15560, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-42751-5.
 - [6] M. de Castro-Cros, M. Velasco, and C. Angulo, “Machine-Learning-Based Condition Assessment of Gas Turbines—A Review,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 24, p. 8468, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248468.
 - [7] S. T. Bunyan et al., “Intelligent Thermal Condition Monitoring for Predictive Maintenance of Gas Turbines Using Machine Learning,” *Machines*, vol. 13, no. 5, p. 401, May 2025, doi: 10.3390/machines13050401.
 - [8] J. Aust, D. Pons, and A. Mitrovic, “Evaluation of Influence Factors on the Visual Inspection Performance of Aircraft Engine Blades,” *Aerospace*, vol. 9, no. 1, p. 18, Dec. 2021, doi: 10.3390/aerospace9010018.
 - [9] Mevissen and M. Meo, “A Review of NDT/Structural Health Monitoring Techniques for Hot Gas Components in Gas Turbines,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 711, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19030711.