

ABSTRAK

Kajian Kelayakan *Condition Base Maintenance (CBM)* Terhadap Interval *Overhaul* Tm2500 PT PLN Batam. Dibimbing oleh Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D sebagai Pembimbing 1 dan Dr.Eng. Marwan Rosyadi, ST, MT Sebagai Pembimbing 2

PT PLN Batam mengoperasikan armada 20 unit turbin gas TM2500 Gen4 SAC yang tersebar di sembilan lokasi strategis dengan karakteristik *isolated grid*. Selama ini, strategi pemeliharaan didominasi oleh pendekatan berbasis waktu (*Time-Based Maintenance/TBM*) yang menetapkan interval *overhaul* secara kaku setiap 12.500 jam operasi, sebuah kebijakan yang dinilai tidak efisien karena mengabaikan kondisi aktual mesin dan sering kali memicu biaya perawatan yang berlebihan (*over-maintenance*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis dari penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance/CBM*) guna mengoptimalkan siklus hidup aset dan efisiensi operasional. Metode penelitian menerapkan pendekatan studi kasus kuantitatif dengan mengintegrasikan data visual *Borescope Inspection* (BSI) dan parameter termodinamika (T48, PS3) sebagai validator teknis utama, serta melakukan evaluasi ekonomi menggunakan metode *Cost Benefit Analysis* (CBA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa unit dengan jam operasi melampaui rekomendasi pabrikan terbukti aman dan laik operasi (*serviceable*) berdasarkan validasi BSI, menihilkan kebutuhan *overhaul* prematur. Implementasi strategi CBM terbukti menurunkan biaya pemeliharaan secara drastis, menghasilkan penghematan biaya langsung sebesar **USD 5.614.431 per tahun**. Analisis kelayakan investasi menghasilkan nilai **Benefit Cost Ratio (BCR)** sebesar **2,36**, dengan *Net Present Value* (NPV) positif dan *Internal Rate of Return* (IRR) melebihi biaya modal. Disimpulkan bahwa strategi CBM memiliki keunggulan teknis dan ekonomis yang signifikan dibandingkan TBM, serta direkomendasikan sebagai standar baru manajemen aset pembangkit untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan pasokan listrik secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Pemeliharaan Berbasis Kondisi, Algoritma Gatekeeper, Inspeksi Borescope, Analisis Biaya-Manfaat, Turbin Gas Aero-derivatif.

ABSTRACT

Assessment Of Condition-Based Maintenance Implementation For Tm2500 Overhaul Intervals: A Case Study Of PT PLN Batam

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.*

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBARAN JUDUL.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
LEMBARAN PENGESAHAN.....	iv
LEMBARAN PENGESAHAN PENGUJI	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR PERSAMAAN	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	8
1.6 Keterbaruan Penelitian	10
1.7 Hipotesis Penelitian.....	11
1.8 Sistematika Penulisan.....	11
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	13
2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan	13
2.1.1 Analisis Sintesis Literatur	19
2.1.2 Arah Penelitian.....	21

2.2 Kajian Literatur yang Relevan	21
2.2.1 Turbin Gas	21
2.2.2 Konsep Pemeliharaan	32
2.2.3 <i>Borescope Inspection</i> (BSI)	36
2.2.4 Teori Dasar Cost Benefit Analysis (CBA)	37
2.2.5 Instrumen dan Parameter Kondisi Kritis TM2500	38
2.3 Kerangka Pemikiran	40
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	42
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian	42
3.2 Objek dan Lokasi Penelitian	43
3.3 Jenis dan Sumber Data	44
3.4 Teknik Analisis Data	45
3.5 Urutan pelaksanaan assesment CBM	49
3.6 Flowchart Metodologi Penelitian	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian	53
4.1.1 Deskripsi unit TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam	53
4.1.2 Distribusi lokasi unit (20 unit di 9 lokasi MPP)	57
4.1.3 Arsitektur sistem modular dan skema roll-in roll-out	59
4.1.4 Jenis bahan bakar yang digunakan (HSD/BBG)	61
4.1.5 Deskripsi kondisi operasi masing-masing unit	64
4.1.6 Ketersediaan dan cakupan data operasional	66
4.2 Hasil Evaluasi Teknis Penerapan CBM	67
4.2.1 Rekapitulasi data parameter operasi aktual	67
4.2.2 Hasil <i>Borescope Inspection</i> (BSI) untuk unit-unit studi kasus	70
4.2.3 Penilaian kelayakan teknis berdasarkan kondisi aktual	71
4.3 Analisis Kinerja Unit Berdasarkan Parameter Operasional	74
4.3.1 Deteksi degradasi atau indikasi penurunan performa	74

4.3.2 Korelasi antara parameter teknis dan hasil BSI	77
4.3.3 Evaluasi Potensi Risiko Jika Overhaul Ditunda.....	80
4.4 Analisis Keekonomian Strategi CBM	83
4.4.1 Estimasi biaya langsung TBM (berdasarkan data historis TRH).....	85
4.4.2 Estimasi biaya dan manfaat CBM.....	86
4.4.3 Perbandingan Biaya antara CBM dan TBM	87
4.4.4 Potensi Penghematan Biaya dengan Penundaan Overhaul	89
4.5 Perhitungan Biaya Penghematan	90
4.6 Pembahasan Strategis	90
4.7 Keterbatasan Penelitian	93
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	96
5.1 Kesimpulan.....	96
5.1.1 Kelayakan Teknis dan Ekonomis Strategi CBM.....	96
5.1.2 Dampak Finansial dan Peningkatan Keandalan.....	97
5.1.3 Hierarki Indikator Utama dan Peran Mutlak BSI	98
5.1.4 Analisis Kelayakan Investasi (CBA) yang Unggul.....	98
5.1.5 Batasan Fokus Efisiensi Biaya dan Variabel Kinerja Jangka Panjang.....	99
5.2 Rekomendasi.....	100
5.2.1 Saran Implementatif (Bagi PT PLN Batam)	101
5.2.2 Saran Akademik (Untuk Penelitian Lanjutan)	101
DAFTAR PUSTAKA	103
Daftar Riwayat Hidup	106
Lembar Perbaikan	107
LEMBARAN BIMBINGAN TESIS.....	110

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Matriks Systematic Literature Review (SLR) Penelitian Terdahulu.....	13
Tabel 2.2 Perbandingan Utama Antara Aero-Derivatif dan Heavy-Duty	25
Tabel 2.3 Spesifikasi Teknis Utama Turbin Gas TM2500	31
Tabel 2.4 Matrik Perbandingan Metode Pemeliharaan Mesin [22].	33
Tabel 3.1 Tabel Klasifikasi Data Primer dan Sekunder	44
Tabel 3.2 Outcome rencana Penelitian kajian penerapan CBM pada TM2500	49
Tabel 4.1 Spesifikasi TM 2500+ PT PLN Batam.....	54
Tabel 4.2 Sebaran Unit Pembangkit TM 2500 + PT PLN Batam	57
Tabel 4.3 . Data Operational Unit MPP PLN Batam	68
Tabel 4.4 .Standar Toleransi Keretakan dan Keausan (BSI Validator)	77
Tabel 4.5 .Simulasi Biaya Pemeliharaan penerapan TBM HAR TM 2500	83
Tabel 4.6 .Realisasi Pemeliharaan dengan Metode CBM di PT PLN Batam	84
Tabel 4.7 Realisasi TBM VS CBM di PT PLN Batam	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sebaran 20 unit Pembangkit PLTG MPP PLN Batam 1	2
Gambar 2.1 Konfigurasi TM2500 [21].	26
Gambar 2.2 Prinsip Dasar TM2500+ [21]	27
Gambar 2.3 Prinsip Kerja TM 2500 [21].	28
Gambar 2.4 RX3i Controller sebagai Otak Sistem Kontrol TM2500 [21]	29
Gambar 2.5 Interface Sistem Variable Geometry Turbin TM2500 berbasis HMI RX3i pada TM2500+	30
Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian	51
Gambar 4.1 Diagram Skema Roll-In Roll-Out (RIRO) PT PLN Batam	60
Gambar 4.2 HMI kontrol Bahan Bakar TM 1 MPP Bangka.....	62
Gambar 4.3 HMI kontrol Bahan Bakar Gas TM 2500 MPP Tarahan	63
Gambar 4.4 Kerusakan HPT Stage 1 MPP Lombok	79

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 1 (2.1).....	38
Persamaan 2 (2.2).....	38
Persamaan 3 (3.1).....	46
Persamaan 4 (3.4).....	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan BSI MPP PT PLN Batam	113
Lampiran 2 Work Pakage Borescope Inspection TM2500	114
Lampiran 3 Fleet Maintenace TM 2500.....	115
Lampiran 4 Loogsheet Parameter TM 2500	116

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

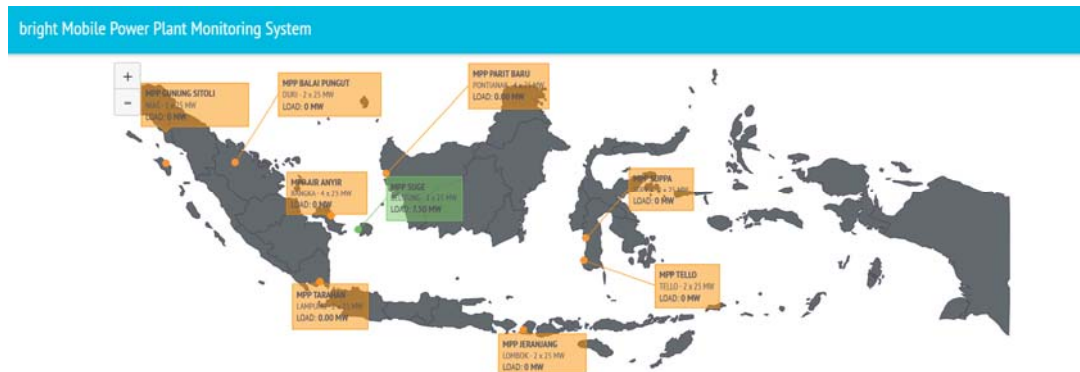
Dalam menghadapi tantangan transisi energi dan tuntutan efisiensi operasional yang semakin tinggi, sektor ketenagalistrikan nasional dituntut untuk mampu mempertahankan keandalan sistem pasokan energi dengan tetap menjaga biaya pokok penyediaan (BPP) pada tingkat kompetitif. Sejalan dengan inisiatif transformasi digital PT PLN (Persero) dan komitmen dekarbonisasi menuju Net Zero Emission 2060, strategi pengelolaan aset pembangkitan perlu didorong ke arah yang lebih prediktif, adaptif, dan berbasis data [1]. Salah satu tantangan utama terletak pada unit-unit pembangkit modular seperti TM2500 Mobile Power Plant (MPP) yang banyak digunakan di sistem isolated grid dan wilayah rawan ketidakstabilan pasokan.

Saat ini PT PLN Batam mengelola 20 unit gas turbin TM2500 Mobile Power Plant (MPP) yang tersebar secara strategis di sembilan lokasi prioritas, yaitu Bangka, Belitung, Duri, Tarahan (Lampung), Pontianak (Kalimantan Barat), Suppa, Tello, Punagaya, dan Lombok. Keseluruhan unit ini dirancang dengan arsitektur modular dan spesifikasi teknis seragam, sehingga memungkinkan penerapan strategi pemeliharaan berbasis rotasi (roll-in roll-out) yang terstandardisasi lintas lokasi. Karakteristik ini menjadikan TM2500 sebagai solusi unggul dalam manajemen pembangkitan pada wilayah dengan sistem grid terbatas atau isolated grid [2].

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai sebaran lokasi operasional unit-unit tersebut, peta distribusi kesembilan titik *Mobile Power Plant* (MPP) di wilayah kerja PT PLN Batam dapat dilihat pada Gambar 1.1 di bawah ini.

Saat ini, sistem pemeliharaan masih didominasi oleh pendekatan Time-Based Maintenance (TBM), dengan interval overhaul konvensional setiap 12.500 jam Total Running Hour (TRH) [3]. Pendekatan berbasis waktu ini terbukti sub-optimal karena mengabaikan kondisi operasional aktual tiap unit. Hasil pengamatan empiris menunjukkan bahwa tidak seluruh komponen mengalami degradasi signifikan pada ambang TRH tersebut. Beberapa unit bahkan tetap menunjukkan performa laik

operasi berdasarkan hasil *Borescope Inspection (BSI)* meskipun telah melampaui 18.000 jam operasi.



Gambar 1.1 Sebaran 20 unit Pembangkit PLTG MPP PLN Batam 1

Sebagai contoh, salah satu studi kasus di MPP Bangka menunjukkan bahwa unit TM2500 dengan TRH lebih dari 18.000 jam tetap laik operasi setelah hasil borescope menyatakan bahwa komponen utama berada dalam kondisi baik. Dampaknya, PLN Batam berhasil menunda overhaul, memperpanjang durasi operasi unit hingga ± 10 bulan, menghindari pengeluaran hingga Rp32 miliar, serta memperoleh tambahan pendapatan hingga Rp50 miliar. Fakta ini memperkuat justifikasi bahwa CBM mampu menghasilkan efisiensi biaya yang signifikan serta meningkatkan tingkat utilisasi unit secara optimal.

Situasi ini menegaskan pentingnya transisi menuju strategi Condition-Based Maintenance (CBM), yakni metode pemeliharaan yang merujuk pada kondisi aktual peralatan berdasarkan pemantauan parameter teknis operasional seperti hasil BSI, temperatur T48, tekanan PS3, serta level vibrasi. Pendekatan ini selaras dengan filosofi pemeliharaan OEM General Electric sebagaimana termuat dalam dokumen GER3695e, yang secara eksplisit merekomendasikan interval pemeliharaan ditetapkan berdasarkan kondisi komponen aktual, bukan sekadar akumulasi jam operasi. Implementasi CBM secara sistemik diyakini mampu memberikan dampak positif berupa efisiensi biaya perawatan, penurunan risiko downtime, serta optimalisasi utilisasi aset secara holistik dan berkelanjutan [4].

Berbagai kajian ilmiah terdahulu secara konsisten menekankan urgensi dan relevansi implementasi Condition-Based Maintenance (CBM) sebagai pendekatan modern dalam pemeliharaan sistem pembangkit dan sektor industri berat. Salah satu

kontribusi awal yang menonjol disampaikan oleh [5], yang memformulasikan sistem pengambilan keputusan berbasis soft computing dengan fuzzy logic untuk memprediksi waktu optimal pemeliharaan pada Combined-Cycle Power Plant (CCPP). Kendati mampu meningkatkan akurasi penjadwalan dan efisiensi biaya, pendekatan tersebut belum mencakup kompleksitas struktural sistem modular seperti TM2500, termasuk karakteristik operasional berbasis roll-in roll-out yang menjadi ciri khas pengoperasian unit di PLN Batam.

Di sisi lain, kajian oleh Nisa Arofi (2018) menunjukkan bahwa penerapan TBM di unit pembangkit PLN Jawa Timur berimplikasi pada pemborosan biaya akibat pelaksanaan overhaul yang tidak mempertimbangkan kondisi aktual komponen [6]. Penelitian ini merekomendasikan pengalihan strategi menuju CBM sebagai pendekatan yang lebih presisi. Kautsar Ilmi et al. (2024), dalam konteks industri alat berat, membuktikan bahwa integrasi CBM berbasis Internet of Things (IoT) dan sistem pemantauan real-time menghasilkan peningkatan durabilitas komponen sebesar 18% serta penghematan biaya pemeliharaan tahunan hingga 27%, memperkuat validitas teknis pendekatan CBM [7].

Selanjutnya, telaah literatur oleh Koerniawan & Wahyu (2024) mengidentifikasi bahwa sebagian besar studi mengenai CBM masih bersifat konseptual [8], dengan keterbatasan implementasi berbasis data empiris. Hal ini mengindikasikan perlunya pendekatan kuantitatif dan ekonomis yang lebih komprehensif. General Electric, sebagai OEM TM2500, melalui Training Manual Maintenance dan Operation Manual [9], secara eksplisit menekankan bahwa interval pemeliharaan tidak semestinya bergantung pada waktu semata, melainkan harus didasarkan pada parameter aktual seperti hasil Borescope Inspection (BSI), temperatur T48, tekanan PS3, serta vibrasi dan histori operasi.

Sementara itu, sumber literatur seperti Ignatiuss Deradjad Pranowo (2019) dalam Sistem dan Manajemen Pemeliharaan, serta studi oleh Prabhakar & Raj (2014), mendukung bahwa CBM sangat tepat diterapkan pada sistem bernilai tinggi dan berisiko tinggi, mengingat kemampuannya dalam mendeteksi degradasi secara dini dan memperpanjang siklus hidup aset melalui pendekatan prediktif berbasis big data [10].

Namun demikian, hingga saat ini belum tersedia studi komprehensif yang mengintegrasikan evaluasi performa teknis—meliputi data T48, PS3, efisiensi termal, dan hasil BSI—dengan analisis keekonomian berbasis Cost Benefit Analysis (CBA) yang spesifik pada unit TM2500. Kesenjangan ini menjadi semakin signifikan mengingat konteks operasional TM2500 yang tersebar secara geografis dalam jaringan isolated grid, dengan tantangan logistik, ketersediaan suku cadang, serta risiko downtime yang tinggi.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang sebagai studi kasus berbasis data aktual dari sembilan lokasi TM2500 PLN Batam, yang akan mengevaluasi kelayakan strategi CBM baik dari aspek teknis maupun finansial. Tujuan akhirnya adalah merumuskan model pemeliharaan berbasis data yang adaptif dan resilien, yang dapat menjadi fondasi kebijakan strategis untuk optimalisasi pemeliharaan unit pembangkit sejenis di masa mendatang.

Dengan kajian ini maka PT PLN Batam dapat mengoptimalkan pengelolaan aset pembangkit modular TM2500 yang tersebar di sembilan lokasi strategis. Namun, praktik pemeliharaan saat ini masih didominasi oleh pendekatan Time-Based Maintenance (TBM) yang menetapkan interval overhaul secara kaku setiap 12.500 jam operasi. Kebijakan statis ini dinilai sub-optimal karena mengabaikan variabilitas operasional aktual dan sering kali memicu fenomena over-maintenance, di mana komponen yang secara fisik masih prima dipaksa untuk menjalani perbaikan besar hanya demi mematuhi jadwal administratif. Kesenjangan antara realitas integritas mekanikal mesin dan batasan waktu kaku ini menciptakan beban biaya operasional yang tidak proporsional, sehingga diperlukan transisi menuju strategi Condition-Based Maintenance (CBM) yang lebih adaptif dan berbasis data.

Kelayakan teknis dari transisi strategi ini bertumpu pada penggunaan parameter termodinamika makro—seperti suhu gas buang (T48) dan tekanan discharge kompresor (PS3)—yang dipantau secara real-time melalui sistem SCADA. Namun, penelitian ini menempatkan Borescope Inspection (BSI) sebagai "Algoritma Gatekeeper" atau validator mutlak yang memegang peran hierarkis tertinggi dalam pengambilan keputusan. Data empiris di lapangan membuktikan bahwa degradasi mesin tidak selalu berkorelasi linier dengan jam operasi; sebagai contoh, unit di MPP

Bangka dan Suge terbukti tetap laik operasi (serviceable) meski telah melampaui 18.000 jam, sementara unit dengan jam operasional rendah justru ditemukan memiliki kerusakan termal kritis. Dengan mengintegrasikan bukti visual fisik sebagai dasar justifikasi teknis, perusahaan dapat mengeksploitasi sisa usia pakai komponen (Remaining Useful Life) secara aman dan sah sesuai panduan standar OEM dalam dokumen GEK 112859.

Secara finansial, implementasi CBM terbukti secara kuantitatif memberikan keunggulan ekonomi yang superior dibandingkan status quo TBM melalui mekanisme Direct Cost Avoidance. Berdasarkan analisis data operasional 20 unit TM2500, strategi CBM mampu mereduksi total biaya pemeliharaan tahunan sebesar 70,23%, yakni dari proyeksi TBM sebesar USD 7.994.431 menjadi hanya USD 2.380.000, yang menghasilkan penghematan biaya langsung hingga USD 5,61 juta per tahun. Justifikasi ekonomi ini semakin diperkuat oleh nilai Benefit-Cost Ratio (BCR) sebesar 2,36, akumulasi Net Present Value (NPV) positif yang diestimasi mencapai USD 56 juta dalam horizon sembilan tahun, serta tingkat Internal Rate of Return (IRR) yang secara signifikan melampaui biaya modal (cost of capital) perusahaan. Dengan demikian, penerapan CBM bukan hanya menjadi solusi teknis untuk menjamin keandalan unit, tetapi juga merupakan keputusan investasi strategis yang masif dalam menekan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik secara berkelanjutan.

Secara khusus, ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada evaluasi strategi CBM terhadap unit gas turbin TM2500 tipe Gen4 SAC yang dioperasikan oleh PT PLN Batam. Cakupan studi meliputi sembilan lokasi Mobile Power Plant (MPP) dengan pendekatan studi kasus berbasis data aktual, termasuk parameter operasional seperti temperatur gas buang (T48), tekanan kompresor (PS3), vibrasi, efisiensi termal, serta dokumentasi hasil Borescope Inspection (BSI). Evaluasi teknis dikombinasikan dengan analisis keekonomian berbasis metode Cost Benefit Analysis (CBA), sehingga ruang lingkup penelitian ini terbatas pada aspek teknis dan finansial tanpa membahas aspek lingkungan atau sosial.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini terletak pada kesenjangan antara pendekatan pemeliharaan berbasis waktu (Time-Based Maintenance/TBM) yang saat ini diterapkan pada unit TM2500 milik PT PLN Batam, dengan potensi implementasi strategi Condition-Based Maintenance (CBM) yang lebih adaptif terhadap kondisi aktual mesin. Pendekatan CBM dinilai memiliki peluang untuk meningkatkan efisiensi biaya operasional dan keandalan sistem pembangkitan, terutama dengan memanfaatkan data hasil *Borescope Inspection (BSI)* sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan dalam bentuk pertanyaan sebagai berikut:

1. Bagaimana kelayakan teknis dan ekonomis dari penerapan strategi CBM pada unit TM2500 di PT PLN Batam, dengan mempertimbangkan data kondisi aktual dari hasil Borescope Inspection (BSI)?
2. Bagaimana dampak implementasi CBM terhadap efisiensi biaya dan keandalan operasional dibandingkan dengan pendekatan TBM, khususnya dalam konteks utilisasi hasil BSI sebagai alat evaluasi utama?
3. Parameter operasional apa saja yang dapat dijadikan indikator utama dalam menentukan waktu pemeliharaan berbasis kondisi, dan sejauh mana keakuratan BSI dibandingkan parameter lainnya?
4. Bagaimana hasil analisis perbandingan antara strategi CBM dan TBM berdasarkan pendekatan Cost-Benefit Analysis (CBA), dengan BSI sebagai input utama dalam evaluasi biaya dan efisiensi operasional unit TM2500 di berbagai lokasi PLN Batam?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan landasan analitis dan operasional dalam mengevaluasi kelayakan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance/CBM*) sebagai alternatif terhadap pendekatan berbasis waktu (Time-Based Maintenance/TBM) pada unit gas turbin TM2500 milik PT PLN Batam. Secara khusus, tujuan penelitian ini mencakup hal-hal berikut

1. Menganalisis kelayakan teknis dan ekonomis dari penerapan strategi CBM pada unit TM2500, berdasarkan parameter operasional aktual dan hasil Borescope Inspection (BSI)
2. Mengevaluasi dampak implementasi CBM terhadap efisiensi biaya pemeliharaan dan peningkatan keandalan operasional dibandingkan dengan pendekatan TBM.
3. Mengidentifikasi parameter operasional kritis yang dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan dalam strategi CBM, termasuk peran metode BSI sebagai indikator utama dalam menentukan interval overhaul.
4. Melakukan analisis perbandingan biaya dan manfaat (Cost-Benefit Analysis/CBA) antara CBM dan TBM sebagai dasar penentuan strategi pemeliharaan yang optimal dan berkelanjutan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini dibagi ke dalam dua kategori, yaitu manfaat akademik dan manfaat praktis. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata baik dalam pengembangan ilmu pengetahuan maupun dalam aplikasi dunia industri.

1. Secara akademik, penelitian ini memperkaya khazanah literatur mengenai strategi pemeliharaan pembangkit berbasis gas turbin, khususnya dalam konteks penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) pada unit TM2500. Hasil studi ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi peneliti dan akademisi dalam mengkaji topik efisiensi dan optimasi pemeliharaan berbasis kondisi aktual.
2. Secara praktis, penelitian ini memberikan dasar analitis bagi manajemen PT PLN Batam dalam mempertimbangkan implementasi CBM secara lebih luas sebagai alternatif strategi pemeliharaan yang lebih efisien dibandingkan dengan pendekatan Time-Based Maintenance (TBM), guna mengurangi downtime, mengoptimalkan utilisasi unit, serta menekan biaya operasional.

3. Penelitian ini juga menghasilkan model evaluasi berbasis data, yang memadukan parameter operasional dan hasil borescope inspection, sebagai pedoman dalam menentukan interval overhaul yang tepat guna.
4. Selain itu, penelitian ini menyediakan kerangka informasi strategis berbasis analisis biaya-manfaat (Cost-Benefit Analysis/CBA) yang dapat digunakan untuk menilai kelayakan investasi sistem monitoring dan mendukung pengambilan keputusan dalam implementasi CBM pada sistem pembangkitan modular secara menyeluruh.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi secara tematik, geografis, dan metodologis guna memastikan fokus analisis tercapai secara terarah dan tidak melebar ke luar dari sasaran utama. Ruang lingkup ini ditetapkan untuk menghindari perluasan pembahasan terhadap aspek yang tidak relevan dengan tujuan evaluasi teknis dan keekonomian strategi pemeliharaan berbasis kondisi pada unit gas turbin TM2500. Secara spesifik, ruang lingkup penelitian ini meliputi:

Penelitian ini hanya mencakup evaluasi strategi pemeliharaan pada unit gas turbin TM2500 tipe Gen4 SAC yang dioperasikan oleh PT PLN Batam, dengan fokus pada aspek kelayakan teknis dan ekonomis penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM) dibandingkan pendekatan konvensional Time-Based Maintenance (TBM).

Ruang lingkup teknis dan metodologis penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Objek penelitian difokuskan pada unit gas turbin TM2500 tipe Gen4 SAC milik PT PLN Batam yang memiliki rekam data operasional lengkap. Tiga unit dijadikan sebagai objek studi kasus utama berdasarkan kelengkapan data dan keterwakilan operasional, yaitu: MPP Bangka, MPP Tarahan (Lampung), dan MPP Lombok.
2. Aspek teknis yang diteliti difokuskan pada evaluasi kondisi aktual komponen kritikal berdasarkan hasil *Borescope Inspection (BSI)* yang dilakukan oleh engineer resmi pabrikan (General Electric/GE). Penilaian utama mencakup kondisi combustion chamber, low pressure turbine (LPT), dan turbine blades,

untuk menentukan apakah komponen masih dalam kondisi serviceable atau memerlukan overhaul. Parameter operasional seperti temperatur gas buang (T48), tekanan kompresor (PS3), vibrasi, dan efisiensi termal digunakan sebagai indikator pendukung untuk memperkuat interpretasi teknis terhadap hasil BSI.

3. Analisis keekonomian menggunakan pendekatan Cost-Benefit Analysis (CBA) yang dibatasi secara ketat hanya pada pengurangan biaya pemeliharaan langsung (Direct Cost Avoidance) melalui penundaan overhaul atau Hot Section Replacement (HSR). Sesuai batasan penelitian, perhitungan ini tidak memperhitungkan variabel perubahan kinerja teknis jangka panjang akibat penundaan jadwal pemeliharaan (seperti perubahan heat rate, degradasi efisiensi bahan bakar spesifik, atau penurunan daya output) guna menjaga objektivitas nilai penghematan biaya kapital murni dan menghindari kompleksitas variabel asuntif. Rentang waktu analisis dibatasi pada kurun waktu historis 1 hingga 5 tahun ke belakang, menggunakan data aktual dari operasional unit TM2500 di lokasi studi kasus. Penelitian tidak melakukan proyeksi ke depan atau simulasi jangka panjang, dan asumsi evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan stabilitas variabel seperti harga suku cadang, biaya pemeliharaan, serta beban operasional pada periode data yang tersedia.
4. Metodologi penelitian bersifat deskriptif-evaluatif dan berbasis data aktual dari lapangan. Penelitian ini tidak mencakup pengembangan sistem pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan (AI), pemodelan keandalan numerik, atau analisis probabilistik kegagalan komponen (seperti Weibull atau Monte Carlo).

Dengan batasan ruang lingkup tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan hasil yang fokus, representatif, dan aplikatif, serta menjadi landasan strategis untuk implementasi Condition-Based Maintenance (CBM) secara bertahap di unit-unit pembangkit modular milik PT PLN Batam.