



TESIS

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

DISUSUN OLEH:

ARIF BUDIMAN

NIM: 202310027

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
SEKOLAH PASCA SARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI PLN
JAKARTA 2026**

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

TESIS



Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar Magister

Disusun Oleh :
ARIF BUDIMAN
NIM: 202310027

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
SEKOLAH PASCA SARJANA
INSTITUT TEKNOLOGI PLN
JAKARTA 2026**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Nama mahasiswa : Arif Budiman

NIM : 202310027

Program studi : Teknik Elektro (Smartgrid and Renewable Energy)

Fakultas : MagisterTeknik

Judul Tesis : Kajian Kelayakan *Condition Base Maintenance (CBM)* Terhadap Kegiatan/ Interval Overhaul Tm2500 PT PLN Batam

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar ~~Ahli Madya/Sarjana~~ Magister*) baik di lingkungan Institut Teknologi PLN maupun di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Pernyataan ini dibuat dengan penuh kesadaran dan rasa tanggung jawab serta bersedia bertanggung jawab segala resiko jika ternyata pernyataan ini tidak benar.



rt, 21 April 2025

(Arif Budiman)

LEMBARAN PENGESAHAN

Judul Tesis : Kajian Kelayaka *Condition Base Maintenance (CBM)*
Terhadap Interval *Overhaul* Tm2500 PT PLN Batam

Nama Mahasiswa : Arif Budiman

NIM : 202310027

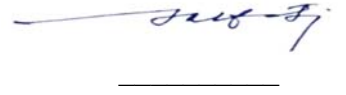
Program Studi : Magister Teknik Elektro

Sekolah : Pasca Sarjana

Disetujui oleh

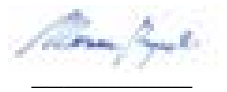
Pembimbing I

Prof. Ir. Syamsir Abduh, M.M., Ph.D., IPU., ASEAN.Eng
NIDN: 0316126802



Pembimbing II

Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T.
NIDN: 0707077403



Diketahui oleh

Kepala Program Studi

Dr. Ir. Retno Aita Diantari, ST., MT
NIDN: 0326098601



Direktur Pascarsarjana

Dr. Luqman, ST., M.Kom., IPM., ASEAN.Eng.
NIDN: 0316067501



LEMBARAN PENGESAHAN PENGUJI

Judul Tesis : Kajian Kelayakan *Condition Base Maintenance (CBM)*
Terhadap Interval *Overhaul* Tm2500 PT PLN Batam
Nama Mahasiswa : Arif Budiman
NIM : 202310027
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Sekolah : Pasca Sarjana

Disetujui oleh

Ketua Penguji

Dr. Ir. Retno Aita Diantari, ST., MT

NIDN: 0326098601



Anggota Penguji I

Dr. Ir. Zainal Arifin., ST., MBA

NIDN: 0311116908



Diketahui oleh

Kepala Program Studi

Dr. Ir. Retno Aita Diantari, ST., MT

NIDN: 0326098601



UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur, Alhamdulillah berkat Rahmat dan Karunia Allah SWT, tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada:

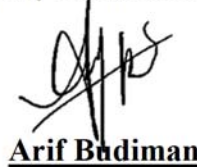
- Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM., PhD., IPU., ASEAN.Eng
Selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan berharga dalam proses penyusunan tesis ini.
- Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T.
Selaku Dosen Pembimbing Kedua yang dengan penuh kesabaran memberikan petunjuk, saran, dan motivasi sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.

Selain itu, saya juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada:

1. Keluarga tercinta – Istri saya, Rosi Oktafiana, serta anak-anak saya Hakim, Azima, dan Hamka, yang selalu menjadi sumber semangat, doa, dan inspirasi. Kehadiran kalian adalah pemicu bagi saya untuk terus berusaha lebih baik lagi. Tidak lupa kepada orang tua dan mertua yang senantiasa memberikan dukungan moral dan doa yang tiada henti.
2. Dr. Musa Partaho Marbun, ST., MT – Selaku pembimbing akademik yang dengan penuh kesabaran dan ketulusan telah memberikan arahan, ilmu, serta motivasi dalam proses penyusunan tesis ini.
3. PT PLN Batam. Atas kesempatan dan izin yang diberikan untuk melakukan penelitian, serta dukungan yang sangat berarti dalam kelancaran penyusunan ini.

Akhir kata, saya menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Namun, dengan segala dukungan, doa, dan bantuan dari berbagai pihak, saya berharap karya ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik di bidang yang saya tekuni. baik

Batam, 15 Januari 2026



Arif Budiman

202310027

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Sebagai sivitas akademika Institut Teknologi PLN, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Arif Budiman
NIM : 202310027
Program Studi : Magister Teknik Elektro
Sekolah : Pasca Sarjana
Judul Tesis : Kajian Kelayakan *Condition Base Maintenance (CBM)*
Terhadap Interval *Overhaul* Tm2500 PT PLN Batam

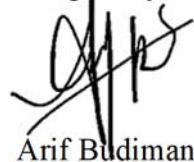
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Institut Teknologi PLN Hak Bebas Royalti Non eksklusif (Non- exclusive Royalty Free Right) atas karya ilmiah saya. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Institut Teknologi PLN berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada Tanggal : 22 November 2025

Yang menyatakan,



Arif Budiman

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

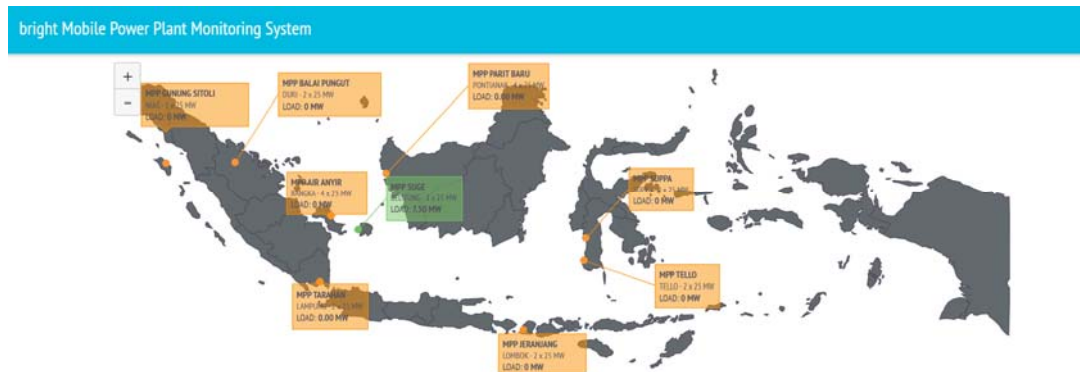
Dalam menghadapi tantangan transisi energi dan tuntutan efisiensi operasional yang semakin tinggi, sektor ketenagalistrikan nasional dituntut untuk mampu mempertahankan keandalan sistem pasokan energi dengan tetap menjaga biaya pokok penyediaan (BPP) pada tingkat kompetitif. Sejalan dengan inisiatif 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.

1.6 Keterbaruan Penelitian

Penelitian ini memiliki sejumlah unsur keterbaruan (novelty) yang membedakannya dari studi-studi sebelumnya dalam bidang strategi pemeliharaan pembangkit berbasis gas turbin.

Pertama, pendekatan penelitian ini memadukan evaluasi teknis dan ekonomis secara terintegrasi, dengan menggabungkan analisis performa aktual mesin—berdasarkan parameter seperti temperatur gas buang (T48), tekanan kompresor (PS3), efisiensi termal, dan terutama hasil Borescope Inspection (BSI)—dengan evaluasi keekonomian berbasis Cost-Benefit Analysis (CBA). Studi terdahulu umumnya hanya menyoroti salah satu aspek secara terpisah.

Kedua, penelitian ini dilakukan pada unit TM2500 dengan konfigurasi modular yang tersebar di beberapa lokasi pembangkitan, dengan fokus utama pada MPP Bangka, MPP Tarahan, dan MPP Lombok. Pendekatan studi kasus multi-site ini memberikan sudut pandang yang lebih komprehensif, aplikatif, dan representatif dibandingkan penelitian terdahulu yang bersifat teoritis atau terbatas pada satu lokasi.

Ketiga, hasil *Borescope Inspection (BSI)* yang selama ini hanya berfungsi sebagai dokumentasi visual teknis, dalam penelitian ini difungsikan sebagai basis pengambilan keputusan strategis. Evaluasi terhadap kondisi combustion chamber, low pressure turbine (LPT), dan blade digunakan untuk menentukan apakah suatu unit masih serviceable sehingga overhaul dapat ditunda secara sah dan aman.

Keempat, penelitian ini memanfaatkan data historis operasional selama 1–5 tahun terakhir, yang memberikan landasan empiris nyata dan relevan dengan kondisi aktual unit. Pendekatan berbasis data ini menjadi pembeda dari penelitian simulatif atau prediktif semata.

Dengan mengombinasikan pendekatan teknis berbasis data aktual, evaluasi keekonomian berbasis CBA, serta lingkup studi yang relevan secara operasional, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi strategis dalam pengembangan kebijakan pemeliharaan berbasis kondisi untuk sistem pembangkitan gas turbin, khususnya di lingkungan pembangkit modular milik PT PLN Batam.

1.7 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan yang telah diuraikan sebelumnya, maka hipotesis dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. **Hipotesis 1 (H1):** Strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance/CBM*) pada unit TM2500 memberikan tingkat kelayakan teknis yang lebih baik dibandingkan strategi berbasis waktu (*Time-Based Maintenance/TBM*), berdasarkan hasil evaluasi parameter operasional aktual dan data visual borescope inspection (BSI).
2. **Hipotesis 2 (H2):** Strategi CBM secara ekonomis lebih efisien daripada TBM, yang dibuktikan melalui nilai Net Present Value (NPV) yang positif dan Internal Rate of Return (IRR) yang melebihi tingkat diskonto (*cost of capital*) dalam perhitungan berbasis Cost-Benefit Analysis (CBA).

1.8 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alur dan struktur penulisan, berikut disajikan sistematika penulisan Tesis ini:

1) Bab I: Pendahuluan

Bab ini berisi Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, Ruang Lingkup Penelitian, Keterbaruan Penelitian (*Novelty*), Hipotesis Penelitian, dan Sistematika Penulisan.

2) Bab II: Tinjauan Pustaka

Bab ini memuat kajian teori dan literatur yang relevan dengan strategi pemeliharaan berbasis kondisi, termasuk konsep CBM dan TBM, borescope inspection (BSI), parameter performa turbin gas, serta pendekatan Cost-Benefit Analysis (CBA). Selain itu, juga disajikan hasil-hasil penelitian terdahulu dan kerangka pemikiran yang mendasari studi ini.

3) Bab III: Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan jenis dan pendekatan penelitian, desain penelitian, teknik pengumpulan dan analisis data, lokasi dan objek penelitian, serta batasan metode yang digunakan untuk menguji hipotesis.

4) Bab IV: Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil analisis data yang diperoleh dari lapangan, termasuk hasil Borescope Inspection dan parameter operasional, kemudian dibahas secara teknis dan ekonomis untuk mengevaluasi strategi CBM dibandingkan TBM.

5) Bab V: Kesimpulan dan Saran

Bab terakhir ini memuat kesimpulan dari hasil penelitian, saran implementatif untuk pengembangan strategi pemeliharaan berbasis kondisi, serta usulan topik lanjutan untuk penelitian masa depan.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Dalam upaya merumuskan strategi pemeliharaan yang optimal bagi unit turbin gas TM2500, diperlukan tinjauan sistematis terhadap penelitian-penelitian terdahulu untuk memetakan perkembangan teknologi dan metodologi manajemen aset. Kajian literatur ini disusun menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi posisi penelitian ini dalam lanskap akademik yang ada. Fokus utama tinjauan ini adalah membandingkan pendekatan pemeliharaan konvensional *Time-Based Maintenance* (TBM) dengan *Condition-Based Maintenance* (CBM), serta menelaah metode evaluasi ekonomi dan teknis yang telah diterapkan sebelumnya.

Melalui pemetaan literatur ini, akan diidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi landasan urgensi penelitian ini. Tabel 2.1 berikut merangkum tujuh penelitian kunci yang relevan, menyoroti metode yang digunakan, hasil utama, serta keterbatasan yang akan dilengkapi oleh tesis ini melalui integrasi data *Borescope Inspection* (BSI), parameter teknis operasi, dan *Cost Benefit Analysis* (CBA) pada unit modular TM2500.

Tabel 2.1 Matriks Systematic Literature Review (SLR) Penelitian Terdahulu

No.	Penulis & Tahun	Topik/Fokus Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Utama	Research Gap (Kesenjangan Penelitian) & Posisi Tesis
1	Prabhakar & Raj (2014)	Perbandingan strategi CBM, TPM, dan RCM di industri proses.	Studi komparatif kualitatif dan tinjauan literatur teoretis.	CBM terbukti unggul dalam meningkatkan reliabilitas aset dan mengurangi gangguan tak terduga	Kekurangan: Studi masih bersifat pendekatan umum pada industri proses, belum spesifik

				(<i>unplanned downtime</i>) dibandingkan metode lainnya.	membahas turbin gas modular TM2500. Tidak ada integrasi data inspeksi visual (BSI) dan tidak membahas aspek ekonomi secara mendetail. Posisi Tesis: Mengaplikasikan konsep CBM pada objek spesifik TM2500 dengan data empiris BSI dan analisis ekonomi kuantitatif.
2	Ciarapica & Giacchetta (2006)	Penerapan CBM pada <i>Combined Cycle Power Plant</i> (CCPP) menggunakan <i>Fuzzy Logic</i> .	<i>Fuzzy Logic</i> dan <i>Soft Computing</i> untuk prediksi kondisi.	Model berhasil memprediksi degradasi komponen dengan akurasi baik dan mampu mengoptimalkan jadwal pemeliharaan.	Kekurangan: Fokus penelitian pada pembangkit konvensional (statis), bukan unit <i>mobile/modular</i> seperti TM2500. Tidak menggunakan

					data BSI sebagai validasi fisik kondisi mesin. Posisi Tesis: Fokus pada unit modular dengan validasi kondisi fisik menggunakan BSI, bukan hanya simulasi logika fuzzy.
3	Nisa Isrofi (2018)	Evaluasi TBM vs CBM menggunakan <i>Cost Benefit Analysis</i> (CBA).	Analisis ekonomi kuantitatif (CBA) dengan indikator NPV.	Implementasi CBM terbukti meningkatkan efisiensi biaya operasional dan masa pakai aset, serta menghasilkan NPV positif.	Kekurangan: Studi kasus dilakukan pada pembangkit konvensional. Belum mengakomodasi karakteristik unik unit modular TM2500 (sistem <i>roll-in roll-out</i>) dan belum mengintegrasikan hasil Borescope Inspection (BSI)

					dalam model keputusannya. Posisi Tesis: Menggabungkan analisis CBA dengan data teknis BSI pada unit modular yang memiliki dinamika logistik berbeda.
4	Kautsar Ilmi et al. (2024)	Implementasi CBM berbasis <i>Internet of Things</i> (IoT) pada alat berat.	Monitoring <i>real-time</i> berbasis sensor IoT dan <i>Big Data</i> .	Mampu meningkatkan durabilitas komponen sebesar 18% dan menghasilkan penghematan biaya operasional sebesar 27%.	Kekurangan: Konteks penelitian adalah alat berat konstruksi umum, bukan spesifik gas turbin pembangkit listrik yang memiliki risiko operasional lebih kritis.

					Posisi Tesis: Menerapkan prinsip monitoring kondisi pada parameter termodinamika turbin gas (T48/PS3) yang lebih kompleks dan presisi.
5	Aldium (2018)	Pengaruh inspeksi (CI, TI, MI) terhadap unjuk kerja turbin gas.	Analisis komparatif kinerja sebelum dan sesudah inspeksi.	Inspeksi rutin terbukti efektif menjaga performa mesin mendekati kondisi desain.	Kekurangan: Masih berbasis <i>Time-Based Maintenance</i> (TBM) murni. Tidak membahas optimalisasi interval inspeksi berdasarkan kondisi aktual (CBM) ataupun analisis ekonominya. Posisi Tesis: Mengembangkan optimalisasi interval

					pemeliharaan dinamis (CBM) berdasarkan data aktual, bukan interval waktu statis.
6	Koerniawan & Wahyu (2024)	Review implementasi CBM di industri manufaktur.	<i>Systematic Literature Review</i> (SLR).	Mayoritas studi mengenai CBM di Indonesia masih berada pada tahap konseptual atau simulasi.	Kekurangan: Minimnya data empiris lapangan dalam literatur yang ada. Posisi Tesis: Tesis ini mengisi celah dengan menyajikan studi kasus empiris menggunakan data operasional riil dan laporan BSI dari armada TM2500 PLN Batam.
7	Aust et al. (2021)	Deteksi kerusakan <i>blade</i> turbin menggunakan	Pengolahan citra digital dan <i>Machine Learning</i> .	Efisiensi dan akurasi analisis visual meningkat signifikan dalam	Kekurangan: Fokus penelitian hanya pada teknis deteksi kerusakan visual.

		<i>image processing.</i>		mendeteksi cacat fisik.	Tidak dikaitkan dengan strategi manajemen pemeliharaan (CBM) secara utuh maupun perhitungan dampak ekonominya. Posisi Tesis: Menggunakan data visual (seperti BSI) bukan hanya untuk deteksi, tetapi sebagai variabel input utama dalam analisis kelayakan ekonomi (CBA) untuk keputusan <i>life extension</i>.
--	--	--------------------------	--	-------------------------	--

2.1.1 Analisis Sintesis Literatur

Berdasarkan matriks SLR di atas, literatur yang ada dapat dikelompokkan ke dalam tiga kluster utama yang membangun argumentasi penelitian ini, yaitu: (1)

Perdebatan strategi TBM vs CBM, (2) Pemanfaatan data inspeksi visual, dan (3) Evaluasi ekonomi aset.

Kritik terhadap Dominasi TBM dan Transisi ke CBM

Literatur yang diwakili oleh Aldium (2018) mencerminkan pendekatan konservatif yang masih mengutamakan kepatuhan terhadap jadwal inspeksi statis (TBM) untuk menjamin performa [11]. Meskipun terbukti menjaga kinerja mesin, pendekatan ini memiliki kelemahan fundamental dalam efisiensi biaya, terutama bagi aset yang beroperasi dengan variabilitas beban tinggi. Di sisi lain, Prabhakar & Raj (2014) memberikan landasan teoritis bahwa pola kegagalan komponen modern sering kali bersifat acak dan tidak selalu berkorelasi linier dengan waktu operasi, sehingga menjadikan TBM kurang relevan [12]. Penelitian ini mengambil posisi sintesis: mengakui pentingnya inspeksi rutin namun mengubah pemicu pelaksanaannya dari "waktu" menjadi "kondisi aktual" yang terukur. Kebaruan tesis ini terletak pada pembuktian empiris menggunakan data TM2500 PLN Batam bahwa transisi ini bukan hanya wacana teoretis, tetapi imperatif operasional yang dapat diukur.

Kesenjangan dalam Pemanfaatan Data Visual (BSI)

Penelitian Aust et al. (2021) dan Kautsar Ilmi et al. (2024) menunjukkan kemajuan signifikan dalam teknologi akuisisi data [13], baik melalui IoT maupun pemrosesan citra [14]. Namun, terdapat kesenjangan yang jelas dalam literatur tersebut: data teknis sering kali berhenti sebagai informasi diagnostik semata tanpa diterjemahkan menjadi keputusan manajerial. Informasi mengenai retakan mikro atau deviasi parameter getaran belum dikaitkan secara langsung dengan konsekuensi finansial penundaan overhaul. Tesis ini mengisi kesenjangan krusial tersebut dengan menempatkan Borescope Inspection (BSI) sebagai variabel validator utama. Dalam penelitian ini, hasil BSI tidak hanya berfungsi sebagai laporan teknis, melainkan sebagai "gatekeeper" dalam algoritma keputusan ekonomi untuk menentukan apakah life extension aset aman untuk dilakukan.

Redefinisi Kelayakan Ekonomi pada Aset Modular

Studi ekonomi yang dilakukan oleh Nisa Isrofi (2018) dan Ciarapica & Giacchetta (2006) memberikan kerangka dasar evaluasi kelayakan [6] [5]. Namun, model yang mereka gunakan umumnya berbasis pada pembangkit statis (konvensional) yang memiliki karakteristik biaya berbeda dengan unit modular seperti TM2500. Unit modular

memiliki dinamika biaya unik, termasuk biaya mobilisasi (roll-in roll-out), kemudahan penggantian modul, dan peran kritisnya dalam sistem isolated grid. Penelitian ini memperluas model Cost Benefit Analysis (CBA) konvensional dengan memasukkan variabel spesifik tersebut, serta menghitung opportunity cost dari potensi pendapatan yang hilang atau didapat. Analisis ini dirancang untuk menjawab pertanyaan spesifik yang belum terjawab oleh literatur sebelumnya: seberapa besar nilai NPV dari risiko yang diambil saat menunda overhaul berdasarkan data visual?

2.1.2 Arah Penelitian

Berdasarkan tinjauan sistematis dan analisis sintesis di atas, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai CBM telah banyak dilakukan secara parsial, baik dari sisi teknis murni maupun ekonomi makro. Namun, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan dalam hal integrasi data visual, parameter operasi, dan analisis ekonomi pada objek spesifik turbin gas modular.

Penelitian ini memposisikan dirinya (*State of the Art*) untuk mengisi celah tersebut dengan menawarkan model evaluasi komprehensif yang menggabungkan validasi fisik melalui Borescope Inspection (BSI) dan parameter teknis (T48/PS3) dengan analisis kelayakan ekonomi (CBA/IRR). Pendekatan integratif ini dirancang khusus untuk mengakomodasi karakteristik operasional unit TM2500, sehingga dapat memberikan kontribusi kebaruan dalam strategi manajemen aset energi yang lebih adaptif, efisien, dan berbasis bukti empiris.

2.2 Kajian Literatur yang Relevan

Bagian ini mengkaji teori-teori fundamental dan literatur utama yang membentuk dasar konseptual dalam mengembangkan pendekatan Condition-Based Maintenance (CBM) untuk optimasi strategi pemeliharaan pada unit pembangkitan gas turbin TM2500.

2.2.1 Turbin Gas

Turbin gas merupakan salah satu inovasi mesin termal paling berpengaruh dalam sejarah teknologi energi modern [15]. Sejak awal pengembangannya pada abad ke-20, turbin gas telah mengalami evolusi signifikan, mulai dari aplikasi penerbangan hingga

penggunaan luas dalam industri pembangkitan listrik [16]. Daya tarik utama turbin gas terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan daya tinggi dalam waktu singkat, fleksibilitas operasional yang superior, serta rasio daya terhadap berat yang menguntungkan.

Perkembangan kebutuhan energi global, khususnya kebutuhan untuk sumber energi yang cepat, andal, dan responsif terhadap fluktuasi beban, telah mendorong adopsi masif turbin gas di sektor pembangkitan. Turbin gas juga menjadi pilihan utama dalam sistem isolated grid dan untuk mendukung integrasi energi terbarukan yang bersifat intermittency tinggi [16]. Selain itu, kemajuan teknologi material tahan panas, kontrol pembakaran presisi, dan teknik modularisasi semakin memperkuat posisi turbin gas sebagai solusi strategis dalam penyediaan energi modern [17].

1. Prinsip Dasar Turbin Gas

Turbin gas beroperasi berdasarkan prinsip dasar konversi energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik melalui serangkaian proses termodinamika yang terstruktur. Proses ini mencakup tiga tahap utama: (1) kompresi udara, (2) pembakaran campuran udara-bahan bakar, dan (3) ekspansi gas panas untuk menghasilkan daya rotasi yang digunakan dalam sistem mekanis, seperti generator listrik [16].

Secara umum, turbin gas bekerja mengikuti Siklus Brayton ideal, yang terdiri dari empat proses teoritis:

- Kompresi isentropik (udara dikompresi adiabatik dan reversibel)
- Pembakaran isobarik (penambahan panas pada tekanan konstan)
- Ekspansi isentropik (gas ekspansi di turbin secara adiabatik)
- Pelepasan panas pada tekanan konstan (pembuangan gas buang)

Dalam kenyataannya, performa turbin gas mengalami deviasi dari Siklus Brayton ideal akibat adanya faktor kerugian (loss factors), seperti inefisiensi kompresor, rugi-rugi pembakaran (combustion losses), dan rugi-rugi mekanis pada turbin. Menurut [18], rasio tekanan (pressure ratio) kompresor dan temperatur maksimum pembakaran menjadi dua parameter utama yang menentukan efisiensi termal siklus.

Untuk lebih memahami alur energi dalam siklus turbin gas, berikut narasi tahapan Siklus Brayton sederhana:

- Udara atmosfer dikompresi di dalam kompresor hingga tekanan tinggi (proses kompresi isentropik).
- Udara bertekanan tinggi dicampur dengan bahan bakar dan dibakar pada tekanan konstan di ruang bakar (proses pembakaran isobarik).
- Gas hasil pembakaran diekspansikan di dalam turbin, menghasilkan energi mekanik (proses ekspansi isentropik).
- Gas buang dilepaskan ke atmosfer pada tekanan konstan (proses pembuangan panas).

Pengaruh langsung prinsip ini pada TM2500 ditunjukkan melalui kemampuannya dalam mencapai start-up cepat (<10 menit) dan adaptasi beban dinamis, yang merupakan hasil dari optimalisasi desain aerodinamis kompresor multi-stage, efisiensi ruang bakar berbahan material superalloy, serta penggunaan kontrol digital RX3i untuk mengoptimalkan pembakaran dalam kondisi variatif [16].

Parameter operasional penting seperti PS2 (tekanan inlet kompresor), PS3 (tekanan outlet kompresor), T3 (temperatur udara masuk ruang bakar), dan T48 (temperatur gas buang) menjadi indikator performa siklus. Menurut "Engine Strip and Build Lab" (2024), fluktuasi kecil pada T48 atau penurunan PS3 dapat menjadi indikasi awal degradasi seperti fouling pada sudu-sudu kompresor, yang secara langsung menurunkan efisiensi siklus.

Dalam standar ISO 3977-2:1997 tentang Gas Turbines – Standard Reference Conditions, ditegaskan bahwa rasio tekanan dan suhu maksimum pembakaran adalah parameter wajib dalam penilaian efisiensi turbin gas. Integrasi pemantauan parameter ini ke dalam sistem pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) menjadi langkah strategis dalam mempertahankan reliabilitas operasional dan menurunkan total cost of ownership unit TM2500 [19].

Dengan demikian, pemahaman mendalam terhadap prinsip kerja turbin gas dan penerapannya dalam kondisi nyata memperkuat landasan teknis untuk

optimalisasi performa, keandalan, dan efisiensi biaya melalui strategi CBM yang berbasis bukti operasional.

2. Jenis Jenis Turbin Gas

Turbin gas dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama berdasarkan karakteristik desain, prinsip kerja, serta aplikasinya dalam sektor energi, yaitu tipe aero-derivatif dan heavy-duty industrial [16].

Perkembangan klasifikasi ini tidak terlepas dari evolusi teknologi mesin pesawat terbang serta kebutuhan pembangkitan daya listrik yang menuntut efisiensi tinggi, responsivitas operasional, dan kemampuan start-up yang cepat. Seiring dengan peningkatan penetrasi energi terbarukan dan kebutuhan isolated grid, dominasi turbin gas, khususnya tipe aero-derivatif, semakin menguat dalam berbagai skenario pembangkitan daya modern [17].

A. Turbin Gas Aero-Derivatif

Turbin gas tipe aero-derivatif merupakan hasil adaptasi teknologi mesin pesawat jet untuk keperluan pembangkitan energi industri. Karakteristik utama dari turbin ini meliputi:

- Rasio daya terhadap berat yang sangat tinggi, menghasilkan desain yang kompak dan ringan.
- Kapabilitas start-up yang sangat cepat, umumnya dalam waktu kurang dari 10 menit, menjadikannya ideal untuk isolated grid, pembangkit listrik mobile, serta kondisi darurat.
- Efisiensi termal yang tinggi, terutama pada operasi beban parsial.
- Tingkat modularitas yang tinggi, memungkinkan perawatan lebih cepat dan fleksibilitas relokasi antar lokasi operasi.

Turbin gas aero-derivatif dirancang untuk memenuhi kebutuhan daya yang dinamis, memberikan keunggulan dalam respons terhadap fluktuasi beban serta integrasi dengan sistem berbasis energi terbarukan [20]. Keunggulan ini menjadikannya lebih adaptif dibandingkan dengan tipe heavy-duty yang lebih mengutamakan operasi stasioner.

B. Turbin Gas Heavy-Duty Industrial

Berbeda dengan tipe aero-derivatif, turbin gas heavy-duty industrial dirancang untuk operasi kontinyu dalam jangka panjang dengan prioritas pada stabilitas dan durabilitas:

- Struktur fisik yang berat dan kokoh untuk mendukung operasi base load berkelanjutan.
- Efisiensi optimal tercapai pada operasi beban penuh.
- Durasi start-up yang lebih lama, berkisar antara 20 hingga 60 menit.
- Didesain untuk aplikasi di pembangkit listrik utama dengan karakteristik permintaan daya non-intermiten.

Guna memperjelas perbedaan mendasar antara kedua karakteristik mesin tersebut secara lebih terstruktur, perbandingan spesifikasi dan operasional utama antara turbin gas tipe Aero-Derivatif dan Heavy-Duty dirangkum pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Perbandingan Utama Antara Aero-Derivatif dan Heavy-Duty

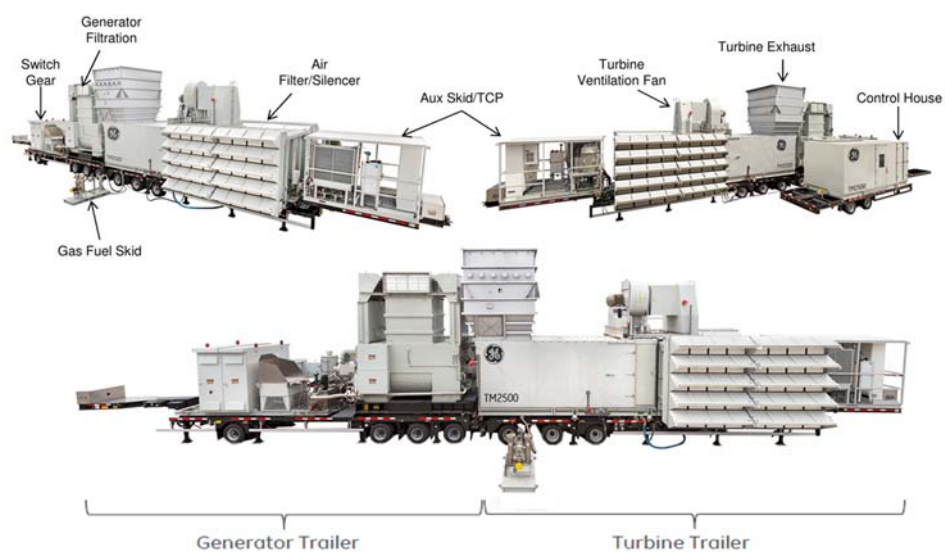
NO.	KARAKTERISTIK	AERO- DERIVATIF	HEAVY- DUTY
1	Rasio Daya terhadap Berat	Sangat Tinggi	Rendah
2	Waktu Start-up	Sangat Cepat (<10 menit)	Lama (20–60 menit)
3	Adaptasi Beban Parsial	Sangat Baik	Terbatas
4	Efisiensi di Beban Variatif	Tinggi	Stabil pada Base Load
5	Mobilitas	Fleksibel	Stasioner
6	Strategi Pemeliharaan	Cocok untuk CBM	Dominan TBM

Dengan memahami karakteristik teknis dan operasional dari kedua jenis turbin ini, dapat disusun strategi optimasi operasi dan pemeliharaan yang lebih efektif. Khususnya dalam konteks sistem kelistrikan modern yang membutuhkan

keandalan, efisiensi energi, serta dukungan terhadap integrasi energi terbarukan, pemilihan tipe turbin gas menjadi salah satu faktor kunci dalam mendukung tujuan keberlanjutan energi nasional secara berkelanjutan.

3. Turbin Gass TM2500

Turbin gas TM2500 merupakan unit pembangkit listrik berbasis teknologi aero-derivatif yang dikembangkan oleh General Electric (GE), dengan mesin inti LM2500+G4 Single Annular Combustor (SAC). TM2500 dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi yang cepat, fleksibel, dan andal, terutama dalam kondisi darurat, isolated grid, serta sistem dengan kebutuhan daya puncak yang dinamis. Visualisasi mengenai konfigurasi fisik dari sistem modular ini, yang mencakup trailer turbin, generator, dan ruang kontrol dalam satu kesatuan sistem terintegrasi, diilustrasikan secara detail pada Gambar 2.1.

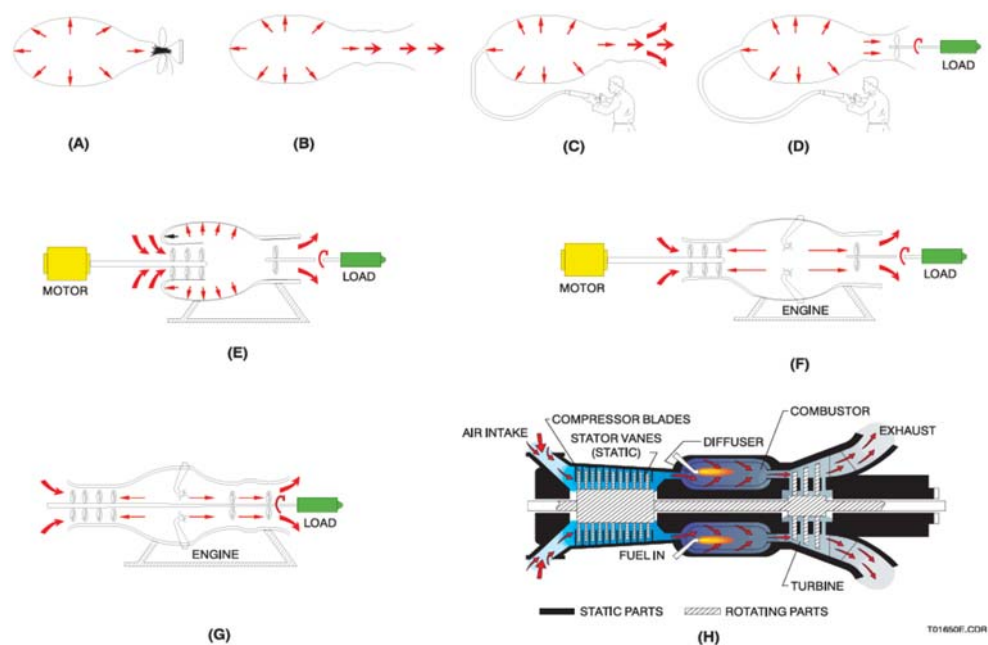


Gambar 2.1 Konfigurasi TM2500 [21].

Konfigurasi TM2500 terdiri atas tiga trailer utama: Turbine Trailer, Generator Trailer, dan Control House Trailer. Setiap trailer dilengkapi dengan subsistem vital seperti fuel skid, sistem start-up otomatis, sistem pelumasan bertekanan tinggi, variable geometry (VG) untuk efisiensi aliran udara, serta proteksi kebakaran berbasis aerosol Stat-X. Modularitas desain ini memungkinkan proses instalasi dan commissioning dapat diselesaikan dalam

waktu 11–14 hari, jauh lebih cepat dibandingkan pembangkit konvensional heavy-duty.

Turbin gas TM2500 beroperasi berdasarkan prinsip kerja Siklus Brayton, yang melibatkan tahapan intake, compression, combustion, dan exhaust secara kontinu. Prinsip ini serupa dengan siklus empat langkah pada mesin pembakaran dalam reciprocating engine, namun pada turbin gas TM2500, proses terjadi dalam aliran fluida yang kontinu, bukan secara intermiten. Skema aliran energi dan transformasi termodinamika yang terjadi selama siklus kerja unit TM2500+ ini dapat dipahami lebih lanjut melalui diagram prinsip dasar yang disajikan dalam Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Prinsip Dasar TM2500+ [21]

Sebagaimana ditunjukkan dalam ilustrasi diagram diatas, prinsip kerja TM2500 mencerminkan proses transformasi energi dalam suatu lintasan aliran kontinu melalui tiga komponen utama: kompresor, kompartemen pembakaran, dan turbin. Fluida kerja (udara) mengalami serangkaian perubahan energi sesuai hukum termodinamika sebagai berikut:

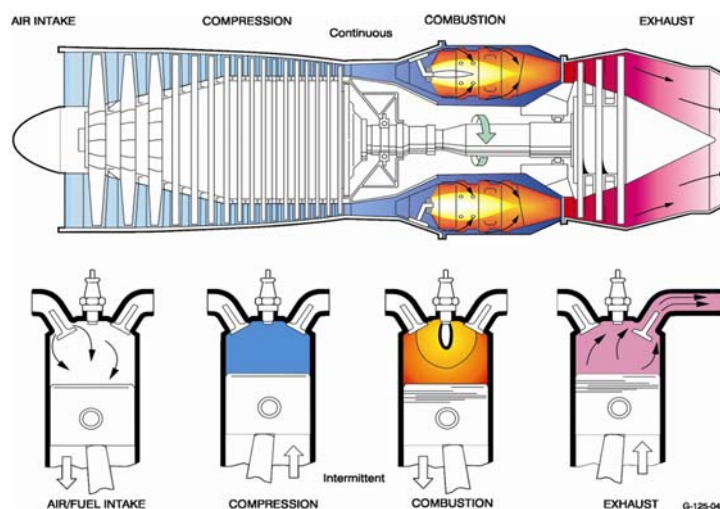
(A–D) menggambarkan analogi fluida dalam sistem tekanan, di mana pengaruh perbedaan tekanan dan arah dorongan menghasilkan vektor gaya

kontinu. Konsep ini serupa dengan pembangkitan daya dorong (thrust) dalam sistem propulsi berbasis fluida.

(E–G) menjelaskan siklus mekanik dalam konfigurasi mesin, di mana motor penggerak (kompresor) menghasilkan aliran udara terkompresi, dialirkan ke ruang bakar dan akhirnya menghasilkan gas ekspansi untuk menggerakkan turbin dan beban (load). Ini merepresentasikan sistem gas generator dan power turbine pada TM2500.

(H) menampilkan potongan penampang membujur dari turbin gas yang lengkap, menggambarkan aliran udara masuk melalui diffuser, dikompresi oleh compressor blades, dicampur dengan bahan bakar dan terbakar di combustor, lalu diekspansikan di turbine untuk menghasilkan daya. Alur kerja ini dikelilingi oleh komponen static parts dan rotating parts, yang bekerja secara harmonis dalam dinamika fluida bertekanan tinggi.

Sistem kerja turbin gas bersifat berkesinambungan (continuous flow), berbeda dari mesin reciprocating yang bersifat intermiten (berulang). Hal ini memungkinkan efisiensi volumetrik yang tinggi, respon cepat terhadap perubahan beban, dan keandalan sistem dalam berbagai kondisi operasional. Untuk mengilustrasikan persamaan tahapan kerja antara turbin gas dan mesin empat langkah, namun dengan mekanisme aliran fluida yang berbeda, representasi visual proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja TM 2500 [21].

Tahap pertama, udara segar dihisap melalui saluran air intake dan dikompresi melalui multi-stage axial compressor, meningkatkan tekanan dan suhu udara. Tahap kedua, udara bertekanan tinggi dialirkan ke ruang bakar Single Annular Combustor (SAC) untuk dicampur dengan bahan bakar dan dibakar secara isobarik, menghasilkan gas panas berenergi tinggi. Gas panas ini kemudian diekspansikan melalui turbin, di mana energi kinetiknya diubah menjadi energi mekanik untuk menggerakkan compressor dan generator.

Proses ekspansi menghasilkan daya putar pada shaft, yang digunakan untuk menghasilkan listrik melalui generator. Akhirnya, gas buang dengan temperatur tinggi ($\sim 520\text{--}540^\circ\text{C}$) dilepaskan ke atmosfer atau diarahkan ke HRSG jika dikonversi menjadi combined cycle. Aliran kerja kontinu ini menghasilkan start-up yang cepat, efisiensi operasional yang tinggi, dan keandalan dalam sistem isolated grid.

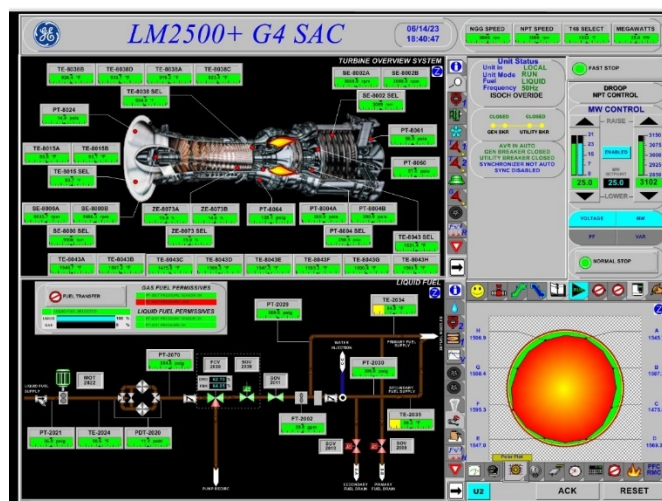
Sebagai mesin berbasis LM2500+G4, TM2500 menawarkan kapabilitas start-up dari cold start hingga full load dalam waktu kurang dari 10 menit. Unit ini mampu menghasilkan output daya sekitar 31,3 MW pada kondisi ISO standar (15°C , sea level), dengan efisiensi termal simple cycle antara 39% hingga 41%. Rasio tekanan kompresor yang tinggi, sekitar 30:1, memungkinkan efisiensi operasional optimal baik pada kondisi beban parsial maupun penuh. Pusat pengendalian seluruh parameter operasional tersebut dijalankan oleh perangkat kontrol digital canggih yang divisualisasikan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 RX3i Controller sebagai Otak Sistem Kontrol TM2500 [21]

Sistem kontrol TM2500 menggunakan PLC RX3i berbasis Human-Machine Interface (HMI) yang terintegrasi, mendukung pemantauan real-time

terhadap parameter kritis seperti NGG (Gas Generator Speed), NPT (Power Turbine Speed), T48 (temperatur gas buang), PS3 (tekanan discharge kompresor), tekanan bahan bakar, vibrasi, dan temperatur oli pelumas. Data ini menjadi fondasi utama penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM), memungkinkan prediksi Remaining Useful Life (RUL) komponen secara akurat dan optimalisasi siklus overhaul. Implementasi pemantauan real-time terhadap parameter kritis dan distribusi sensor pada antarmuka operator (HMI) dapat dilihat pada representasi visual di Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Interface Sistem Variable Geometry Turbin TM2500 berbasis HMI RX3i pada TM2500+

Sistem tersebut mengintegrasikan berbagai sensor tekanan (PT), suhu (TE), dan kecepatan rotasi (SE) di berbagai zona mesin, mulai dari kompresor, ruang bakar, hingga turbin. Setiap parameter dikomunikasikan secara real-time ke Human-Machine Interface (HMI) yang terhubung dengan sistem PLC RX3i, yang memungkinkan operator memperoleh data akurat untuk evaluasi performa dan pengambilan keputusan pemeliharaan.

Fitur-fitur seperti PT-8024 (pressure transmitter di bagian inlet), TE-8015 (suhu udara masuk), TE-8038 dan TE-8043 (suhu intermediate dan exhaust), serta indikator posisi variabel geometri ZE-8075 menunjukkan bahwa sistem ini memiliki kontrol dinamis terhadap sudu kompresor dan parameter pembakaran, mendukung efisiensi termal dan kestabilan operasi. Seluruh data yang terpantau

tersaji dalam bentuk grafik digital pada HMI, memberikan umpan balik secara visual dan numerik kepada teknisi lapangan.

Dengan adanya sistem HMI ini, TM2500 mampu beradaptasi terhadap variasi beban dan kondisi lingkungan, sekaligus mengoptimalkan efisiensi pembakaran dan mengurangi emisi NOx. Hal ini menjadikan TM2500 bukan hanya sebagai pembangkit mobile berkapasitas tinggi, tetapi juga sebagai unit yang sepenuhnya terintegrasi dengan konsep pemeliharaan berbasis data dan prediksi kegagalan komponen secara presisi.

Dari aspek keselamatan, TM2500 dilengkapi dengan Combustible Gas Detector dan Thermal Spot Detector, yang mendukung deteksi dini potensi kebakaran, serta sistem pemadaman berbasis aerosol untuk mitigasi risiko tanpa merusak sistem elektronik dan mekanikal. Rincian spesifikasi teknis utama yang mencakup parameter performa dan batasan operasional dari Turbin Gas TM2500 disajikan secara lengkap pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Spesifikasi Teknis Utama Turbin Gas TM2500 (Mengacu Gevernova/GE 2024)

No.	Parameter	Nilai
1	Tipe Turbin	Aero-derivatif, Mobile Gas Turbine
2	Model Mesin	LM2500+G4 SAC (Single Annular Combustor)
3	Kapasitas Output	31,3 MW (ISO Condition, 15°C, Sea Level)
4	Efisiensi Termal (Simple Cycle)	39% hingga 41%
5	Waktu Start-up	<10 menit (cold start to full load)
6	Rasio Tekanan Kompresor	~30:1
7	Kecepatan Rotor Gas Generator (NGG)	9.750 RPM
8	Kecepatan Rotor Power Turbine (NPT)	3.000 RPM atau 3.600 RPM (tergantung sistem grid)

9	Temperatur Gas Buang (T48)	~520°C – 540°C
10	Sistem Kontrol	PLC RX3i berbasis HMI terintegrasi
11	Sistem Proteksi Kebakaran	Aerosol-based Stat-X, Combustible Gas Detector, Thermal Spot Detector
12	Monitoring Parameter Kritis	NGG, NPT, T48, PS3, tekanan bahan bakar, vibrasi, temperatur oli
13	Konfigurasi Trailer	Turbine Trailer, Generator Trailer, Control House Trailer
14	Mode Operasi	Simple Cycle (opsional Combined Cycle dengan HRSG tambahan)
15	Masa Instalasi	11–14 hari
16	Standar Emisi	Didesain untuk mendukung target pengurangan emisi NOx rendah

Selain dioperasikan dalam mode simple cycle, TM2500 juga dapat dikonversi ke mode combined cycle dengan penambahan Heat Recovery Steam Generator (HRSG), memungkinkan peningkatan efisiensi total sistem hingga sekitar 50%. Namun, dalam banyak aplikasi isolated grid, mode simple cycle tetap menjadi pilihan utama karena kecepatan respons dan kemudahan mobilitasnya.

Spesifikasi teknis utama TM2500 sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.3 menunjukkan bahwa unit ini menggabungkan keunggulan kecepatan instalasi, fleksibilitas operasional, efisiensi termal tinggi, serta kesiapan integrasi monitoring berbasis data, menjadikannya solusi unggul dalam memenuhi kebutuhan energi modern yang menuntut keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan.

2.2.2 Konsep Pemeliharaan

Pemeliharaan dalam konteks ketenagalistrikan mencakup rangkaian tindakan teknis dan administratif untuk menjaga peralatan tetap dalam kondisi operasional optimal serta menghindari kerusakan yang dapat mengganggu kontinuitas pasokan listrik. Menurut ISO 14224, pemeliharaan adalah kombinasi dari aktivitas untuk

mempertahankan atau mengembalikan aset ke kondisi operasional yang sesuai dengan tujuan awalnya.

Pemilihan strategi pemeliharaan yang tepat akan mempengaruhi efisiensi operasional dan biaya siklus hidup dari aset pembangkitan. Menurut [18] menyatakan bahwa pendekatan yang terlalu sering akan menyebabkan overmaintenance, sedangkan pendekatan yang terlalu jarang meningkatkan risiko unplanned outage. Sebagai landasan dalam memilih strategi yang paling efektif, perbandingan komprehensif mengenai kelebihan dan kekurangan dari berbagai metode pemeliharaan utama diuraikan dalam matriks pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Matrik Perbandingan Metode Pemeliharaan Mesin [22].

Jenis Maintenance	Kelebihan	Kekurangan
Corrective (CM)	▪ Tidak memerlukan perencanaan rumit. ▪ Cocok untuk komponen non-kritis. ▪ Tidak ada biaya pemeliharaan sampai kerusakan terjadi.	▪ Potensi kerusakan menyebar ke sistem lain. ▪ Downtime tinggi dan biaya perbaikan bisa membengkak. ▪ Tidak cocok untuk sistem penting seperti turbin utama.
Preventive (PM)	▪ Mencegah kerusakan besar. ▪ Jadwal tetap memudahkan pengadaan suku cadang dan personel. ▪ Memperpanjang umur komponen.	▪ Tidak mempertimbangkan kondisi aktual komponen. ▪ Berisiko melakukan perawatan yang tidak perlu (overmaintenance). ▪ Tidak fleksibel jika terjadi perubahan beban atau kondisi operasi.
Predictive (PdM)	▪ Menggunakan data untuk memprediksi kerusakan. ▪ Meminimalkan downtime tak terduga. ▪ Cocok untuk mesin bernilai tinggi seperti TM2500.	▪ Membutuhkan perangkat pemantauan canggih (sensor, SCADA). ▪ Diperlukan keahlian dalam analisis data dan interpretasi tren. ▪ Investasi awal cukup tinggi.

A. *Corrective Maintenance (CM)*

Corrective Maintenance (CM) adalah pendekatan pemeliharaan yang dilakukan setelah suatu komponen atau sistem mengalami kegagalan atau kerusakan. Strategi ini bersifat reaktif, artinya tindakan pemeliharaan baru diambil ketika telah terjadi gangguan. Pendekatan ini paling sederhana namun memiliki potensi risiko yang besar dalam konteks sistem kritis.

Dalam praktiknya, CM diterapkan ketika biaya pemeliharaan preventif tidak sebanding dengan risiko kerusakan, atau ketika sistem cadangan tersedia sehingga kerusakan tidak berdampak langsung terhadap operasional. Misalnya pada komponen pendukung seperti sistem penerangan atau perangkat bantu lainnya.

Kelebihan CM antara lain adalah efisiensi dalam penggunaan sumber daya karena pemeliharaan dilakukan hanya ketika diperlukan. Namun, kekurangannya adalah risiko terjadinya downtime yang tinggi, potensi kerusakan lanjutan, serta biaya perbaikan yang dapat lebih besar dibandingkan dengan strategi pemeliharaan lainnya.

Pada sistem pembangkitan seperti TM2500, CM tidak disarankan untuk komponen utama seperti turbin dan generator karena kerusakan pada bagian tersebut dapat menyebabkan gangguan besar dalam penyediaan daya. Oleh karena itu, strategi ini hanya digunakan untuk sistem non-kritis dan pelengkap.

B. *Preventive Maintenance (PM)*

Preventive Maintenance (PM) merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal dengan tujuan mencegah terjadinya kerusakan atau degradasi performa peralatan. Strategi ini bersifat proaktif dan umumnya dilaksanakan dalam bentuk inspeksi berkala, pelumasan, penggantian komponen, serta penyesuaian sistem berdasarkan siklus waktu atau siklus kerja peralatan.

Salah satu bentuk umum dari preventive maintenance adalah Time-Based Maintenance (TBM), di mana jadwal pemeliharaan ditentukan berdasarkan interval waktu tetap, tanpa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. Pada unit TM2500, TBM umumnya diterapkan dalam siklus 12.500 jam operasi, seperti yang direkomendasikan oleh [21], yang mencakup inspeksi, penggantian komponen hot section, dan overhaul besar.

Kelebihan dari PM adalah kemampuannya dalam menurunkan kemungkinan terjadinya gangguan operasional karena kegagalan mendadak. Hal ini memungkinkan perencanaan perawatan dan logistik suku cadang menjadi lebih terkendali. Namun, kelemahan dari pendekatan ini adalah potensi terjadinya overmaintenance, yaitu ketika tindakan perawatan dilakukan meskipun komponen masih berada dalam kondisi baik.

PM menjadi penting dalam sistem pembangkitan karena menjaga ketersediaan unit dan memperpanjang usia pakai komponen kritikal. Namun, dalam konteks modern, PM konvensional mulai dilengkapi dengan pendekatan berbasis data untuk meningkatkan efisiensi biaya dan efektivitas keputusan perawatan.

C. *Predictive Maintenance (PdM)*

Predictive Maintenance (PdM) merupakan pendekatan pemeliharaan yang berbasis data dan bertujuan untuk memperkirakan kapan sebuah komponen akan mengalami kegagalan, sehingga tindakan perawatan dapat dilakukan secara tepat waktu. PdM memanfaatkan data sensor dan algoritma analisis tren, yang memungkinkan tim pemeliharaan memantau kondisi aktual peralatan secara real-time dan merespons potensi kerusakan sebelum benar-benar terjadi.

Dalam PdM, berbagai parameter seperti suhu, tekanan, getaran, dan aliran digunakan sebagai indikator performa. Melalui pemantauan jangka panjang, perubahan nilai normal dapat ditelusuri untuk mendeteksi adanya degradasi komponen. Sistem ini mengandalkan teknologi seperti Internet of Things (IoT), sistem SCADA, dan perangkat lunak analitik untuk memproses data dan memberikan peringatan dini terhadap potensi kegagalan.

Keunggulan utama dari PdM adalah efisiensi biaya dan peningkatan keandalan peralatan. Karena tindakan pemeliharaan dilakukan hanya saat diperlukan, hal ini menghindarkan perusahaan dari overmaintenance. Selain itu, downtime dapat ditekan secara signifikan karena prediksi kegagalan memungkinkan penjadwalan pemeliharaan lebih fleksibel dan tidak mengganggu produksi.

Dalam konteks turbin gas TM2500, PdM sangat relevan karena mesin ini beroperasi dalam kondisi dinamis dan membutuhkan keandalan tinggi. Parameter seperti T48 (exhaust gas temperature), tekanan discharge, dan vibrasi menjadi indikator utama

dalam strategi prediktif. Data ini dikumpulkan melalui sensor onboard dan dievaluasi secara berkala menggunakan software diagnostik.

Penggunaan PdM juga memungkinkan integrasi dengan sistem CBM, di mana data yang terkumpul tidak hanya digunakan untuk prediksi tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan operasional [21]. Sinergi antara PdM dan CBM akan semakin memperkuat efektivitas program pemeliharaan dan meningkatkan keberlanjutan sistem.

Secara keseluruhan, penerapan PdM pada sistem pembangkitan modern seperti TM2500 membawa perubahan paradigma dari pendekatan pemeliharaan konvensional menuju pemeliharaan berbasis kecerdasan data dan teknologi digital.

2.2.3 Borescope Inspection (BSI)

Borescope Inspection (BSI) adalah metode inspeksi visual non-destruktif yang menggunakan kamera optik fleksibel untuk mengamati bagian dalam mesin atau komponen tertutup tanpa perlu melakukan pembongkaran secara menyeluruh [21]. Teknik ini menjadi sangat penting dalam pemeliharaan mesin-mesin berteknologi tinggi seperti turbin gas TM2500 karena mampu memberikan informasi visual mengenai kondisi aktual komponen-komponen internal yang tidak mudah diakses secara langsung. BSI memungkinkan tim pemeliharaan untuk mengevaluasi kondisi komponen penting seperti nozzle, blade, ruang bakar, dan bagian hot section lainnya. Dengan bantuan lensa optik dan sistem pencahayaan canggih, inspeksi dapat dilakukan dengan akurasi tinggi tanpa mengganggu operasi mesin secara keseluruhan [19]. Prosedur ini biasanya dilakukan selama shutdown terjadwal, dan hasilnya dijadikan acuan dalam perencanaan pemeliharaan selanjutnya.

Menurut [21], hasil dari BSI menjadi dasar utama dalam penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM) [9]. BSI menggantikan pendekatan tradisional berbasis Total Running Hour (TRH) yang sebelumnya digunakan untuk menentukan interval overhaul. Dengan menganalisis kondisi aktual seperti erosi, deformasi, retakan termal, atau akumulasi deposit, tim teknis dapat menentukan apakah suatu komponen masih layak digunakan atau memerlukan tindakan lanjutan.

Manfaat utama dari BSI adalah kemampuannya untuk mendeteksi dini kerusakan sebelum menyebabkan kegagalan sistem secara menyeluruh. Selain itu, dengan data

visual yang valid, manajemen dapat menunda tindakan overhaul secara sah, sehingga menghemat biaya perawatan, memperpanjang masa operasi mesin, dan meningkatkan availabilitas unit. Studi kasus di beberapa unit TM2500 PLN Batam menunjukkan bahwa hasil BSI yang menyatakan mesin dalam kondisi baik memungkinkan pengoperasian tambahan hingga 6.000 jam tanpa overhaul, yang berarti efisiensi finansial dan operasional yang signifikan.

BSI juga berperan penting dalam mendukung program audit teknis, pemenuhan standar OEM, dan dokumentasi pemeliharaan. Data hasil inspeksi dapat diarsipkan sebagai bagian dari digital twin untuk pembandingan pada inspeksi selanjutnya, sekaligus memperkuat keputusan berbasis bukti dalam manajemen aset.

Dengan demikian, BSI bukan hanya metode inspeksi, tetapi telah menjadi komponen kunci dalam strategi pemeliharaan prediktif dan CBM. Integrasinya dengan data sensor dan sistem Logic yang dihunakan (RX3i) menjadikan metode ini sangat relevan dalam menghadapi tantangan keandalan dan efisiensi di era digitalisasi pembangkitan listrik. bahwa hasil BSI menjadi dasar utama dalam penerapan CBM, menggantikan patokan TRH sebagai satu-satunya referensi jadwal overhaul. Dengan dukungan hasil BSI, keputusan untuk menunda atau mempercepat overhaul dapat dibuat secara lebih akurat berdasarkan kondisi aktual komponen

2.2.4 Teori Dasar Cost Benefit Analysis (CBA)

Cost Benefit Analysis (CBA) adalah metode analisis kuantitatif yang digunakan untuk menilai kelayakan suatu keputusan, proyek, atau kebijakan dengan cara membandingkan secara sistematis antara nilai manfaat (benefit) dan biaya (cost) yang timbul. Dalam konteks manajemen aset dan strategi pemeliharaan, CBA sangat relevan digunakan untuk mengevaluasi apakah pendekatan *Condition-Based Maintenance* (CBM) secara ekonomi lebih efisien dibandingkan *Time-Based Maintenance* (TBM) [23].

Proses CBA mencakup empat tahap utama [19]: (1) identifikasi seluruh biaya langsung dan tidak langsung; (2) estimasi semua manfaat yang dapat diperoleh; (3) menghitung nilai bersih manfaat melalui diskonto ke nilai sekarang (present value); dan (4) membandingkan antara total manfaat dan total biaya. Salah satu alat kuantitatif penting dalam proses ini adalah Net Present Value (NPV), yang dirumuskan sebagai:

$$NPV = \sum ((Bt - Ct) / (1 + r)^t), \quad \text{Persamaan 1 (2.1)}$$

Dengan:

- Bt = manfaat (benefit) pada tahun ke- t ,
- Ct = biaya (cost) pada tahun ke- t ,
- r = tingkat diskonto,
- t = tahun ke- t .

Jika $NPV > 0$, maka proyek atau strategi dianggap layak secara ekonomi. Sebaliknya, jika $NPV < 0$, maka proyek dinilai merugikan. Sebagai pelengkap, digunakan pula pendekatan Internal Rate of Return (IRR), yaitu tingkat diskonto di mana nilai NPV menjadi nol:

$$NPV = 0 = \sum ((Bt - Ct) / (1 + IRR)^t) \quad \text{Persamaan 2 (2.2)}$$

IRR digunakan untuk membandingkan efisiensi relatif antara berbagai alternatif strategi, terutama ketika dana yang tersedia terbatas. Dalam studi ini, IRR dapat membantu menunjukkan tingkat pengembalian dari penghematan yang diperoleh akibat penundaan overhaul berdasarkan hasil borescope inspection (BSI). Penerapan CBA dalam konteks pemeliharaan TM2500 di PT PLN Batam mencakup perbandingan antara biaya langsung dari overhaul (sekitar USD 2,6 juta per unit) dengan potensi manfaat seperti penghindaran downtime, efisiensi operasional tambahan, dan potensi pendapatan dari jam operasi tambahan.

Data aktual dari operasional TM2500 menjadi acuan utama, termasuk rata-rata beban, harga jual listrik, serta waktu operasi efektif pasca penundaan overhaul. Dengan pendekatan ini, hasil evaluasi tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga memberikan dasar keputusan yang kuat dari sisi ekonomi dan manajerial, yang pada akhirnya memperkuat strategi optimalisasi pemeliharaan berbasis kondisi di lingkungan industri pembangkitan.

2.2.5 Instrumen dan Parameter Kondisi Kritis TM2500

Pemeliharaan dalam konteks ketenagalistrikan merupakan rangkaian aktivitas teknis yang bertujuan menjaga aset tetap dalam kondisi operasional optimal untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik. Dalam praktiknya, strategi pemeliharaan pada unit TM2500 mengalami evolusi dari pendekatan berbasis waktu (Time-Based

Maintenance/TBM) yang bersifat kaku dengan interval overhaul setiap 12.500 jam, menuju pendekatan yang lebih adaptif yaitu Condition-Based Maintenance (CBM). Strategi CBM mengandalkan pemantauan kesehatan mesin secara real-time untuk menentukan sisa usia pakai (Remaining Useful Life) komponen, sehingga meminimalkan risiko over-maintenance maupun kegagalan katastropik.

Keandalan strategi CBM pada unit aero-derivatif TM2500 tidak hanya bertumpu pada inspeksi visual, tetapi didukung oleh integrasi berbagai instrumen Condition Monitoring (CM) yang mengukur parameter termodinamika dan mekanikal secara presisi. Instrumen-instrumen kunci tersebut meliputi:

1. Monitoring Temperatur Gas Buang (T48): Sensor termokopel yang terpasang pada jalur gas panas berfungsi memantau efisiensi pembakaran. Fluktuasi pada nilai T48 atau ketidakrataan distribusi suhu (T48 Spread) merupakan indikator awal adanya degradasi pada fuel nozzle, kerusakan combustion liner, atau deformasi pada sudu turbin.
2. Monitoring Tekanan Discharge Kompresor (PS3): Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja kompresor aksial 17-tahap. Penurunan nilai PS3 di bawah ambang standar (180–200 psia) mengindikasikan terjadinya fenomena fouling atau penumpukan deposit kotoran pada sudu kompresor yang dapat menurunkan efisiensi termal siklus secara signifikan.
3. Analisis Vibrasi (Aksial & Radial): Sensor getaran terintegrasi memantau kestabilan mekanis pada poros dan bearing. Tingkat vibrasi yang melampaui standar OEM GE (≤ 3 mm/s) menjadi sinyal adanya ketidakseimbangan rotor atau degradasi pada komponen bantalan sebelum kerusakan fisik yang lebih parah terjadi.
4. Equivalent Full Service Cycle (EFSC): Berbeda dengan jam operasi linear (TRH), EFSC mengukur akumulasi kelelahan termal (thermal fatigue) berdasarkan jumlah siklus start-stop. Hal ini sangat krusial bagi unit yang dioperasikan sebagai peaker, karena kerusakan material sering kali lebih dipengaruhi oleh siklus panas-dingin daripada sekadar durasi operasi.

Seluruh parameter teknis ini diakuisisi secara kontinu oleh PLC GE RX3i dan divisualisasikan melalui antarmuka HMI (Human-Machine Interface). Integrasi antara data sensorik numerik ini dengan validasi visual dari Borescope Inspection (BSI)

membentuk sistem pengambilan keputusan yang holistik dalam "Algoritma Gatekeeper". Dengan demikian, pemeliharaan berbasis kondisi memungkinkan PT PLN Batam untuk melakukan penundaan overhaul secara sah dan aman, selama parameter operasional berada dalam rentang normal dan kondisi fisik internal dinyatakan serviceable oleh validator visual.

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini dibangun berdasarkan hubungan logis antara latar belakang permasalahan, kajian literatur, serta tujuan penelitian yang ingin dicapai. Secara garis besar, kerangka pemikiran ini menggambarkan alur berpikir yang menghubungkan keterbatasan pendekatan Time-Based Maintenance (TBM) yang masih diterapkan di unit TM2500 PLN Batam, dengan peluang penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM) berbasis data aktual hasil Borescope Inspection (BSI) dan pemantauan parameter operasional.

Permasalahan utama yang diidentifikasi adalah inefisiensi biaya dan potensi overmaintenance akibat penerapan strategi TBM konvensional yang tidak mempertimbangkan kondisi aktual komponen. Berdasarkan kajian literatur, pendekatan CBM menawarkan solusi yang lebih adaptif dengan mengandalkan indikator teknis aktual seperti temperatur gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), vibrasi, serta hasil inspeksi visual dari BSI. Penerapan CBM diharapkan mampu memperpanjang masa operasi komponen, meningkatkan keandalan sistem pembangkitan, serta menekan biaya pemeliharaan.

Untuk membuktikan hipotesis tersebut, penelitian ini mengintegrasikan analisis teknis dengan evaluasi keekonomian berbasis Cost Benefit Analysis (CBA). Data teknis aktual dari unit TM2500 akan digunakan untuk menentukan kelayakan teknis penerapan CBM, sedangkan analisis NPV dan IRR akan digunakan untuk mengukur kelayakan ekonominya dibandingkan dengan pendekatan TBM.

Dengan demikian, kerangka pemikiran penelitian ini membentuk jalur logis sebagai berikut:

1. Identifikasi Permasalahan Inefisiensi dan Keterbatasan TBM

Dilakukan dengan mengkaji praktik TBM saat ini di unit TM2500 PLN Batam, termasuk analisis biaya pemeliharaan, frekuensi overhaul, downtime akibat kegagalan komponen, serta ketidakefisienan yang timbul karena overmaintenance.

2. Penguatan Solusi Melalui Kajian Literatur Terkait CBM dan CBA

Ditujukan untuk memperoleh landasan teoretis dan empiris terkait keunggulan CBM dibandingkan TBM, serta pendekatan evaluasi keekonomian berbasis CBA untuk menilai kelayakan implementasi perubahan strategi pemeliharaan.

3. Pengumpulan dan Analisis Data Teknis Aktual

Data yang dikumpulkan meliputi hasil Borescope Inspection (BSI), tren parameter operasional (T48, PS3, vibrasi), serta histori performa operasional unit. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi degradasi komponen dan potensi optimalisasi interval overhaul.

4. Evaluasi Kelayakan Teknis Penerapan CBM

Meliputi analisis kelayakan teknis berdasarkan hasil BSI dan tren parameter operasional, termasuk kriteria kelayakan komponen, prediksi usia sisa (Remaining Useful Life/RUL), serta potensi penyesuaian strategi pemeliharaan berbasis kondisi aktual.

5. Evaluasi Keekonomian Strategi CBM Menggunakan Metode CBA

Melibatkan perhitungan NPV dan IRR untuk membandingkan biaya dan manfaat penerapan CBM versus TBM, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti biaya overhaul, penghematan downtime, pengurangan risiko kegagalan, serta peluang peningkatan pendapatan dari ketersediaan operasional yang lebih tinggi.

6. Formulasi Rekomendasi Penerapan CBM untuk Optimalisasi Strategi Pemeliharaan di TM2500 PLN Batam

Penyusunan rekomendasi berbasis hasil analisis teknis dan keekonomian, yang mencakup model implementasi CBM, strategi monitoring berkelanjutan, serta estimasi dampak positif terhadap efisiensi biaya pemeliharaan, keandalan sistem, dan kontribusi terhadap target keberlanjutan energi nasional.

Model kerangka pemikiran ini menjadi dasar dalam penyusunan metodologi penelitian, analisis data, serta penyusunan kesimpulan dan rekomendasi dalam tesis.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian terapan (applied research) yang bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan praktis di lingkungan industri pembangkitan, khususnya dalam optimalisasi strategi pemeliharaan pada unit turbin gas TM2500. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini bersifat kuantitatif karena melibatkan pengukuran, perhitungan nilai ekonomi, serta analisis numerik berdasarkan data aktual dari sistem pembangkitan.

Jenis pendekatan penelitian ini juga merupakan studi kasus, yang difokuskan pada satu entitas operasional spesifik, yaitu PT PLN Batam yang mengelola unit TM2500. Studi kasus memungkinkan pendalaman konteks dan kompleksitas riil yang dihadapi oleh operator dalam memilih strategi pemeliharaan antara Time-Based Maintenance (TBM) dan Condition-Based Maintenance (CBM).

Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis data-data hasil borescope inspection, efisiensi termal, parameter operasional (T48, PS3, vibrasi), serta perhitungan ekonomis berdasarkan teori Cost Benefit Analysis (CBA). Data ini kemudian diproses menggunakan rumus matematis untuk menentukan kelayakan strategi pemeliharaan.

Kombinasi antara pendekatan kuantitatif dan studi kasus memberikan ruang untuk memahami fenomena teknis dan ekonomis secara simultan. Penelitian ini tidak hanya berorientasi pada nilai akhir secara finansial, tetapi juga pada validitas teknis sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Pendekatan ini dipilih karena strategi pemeliharaan merupakan bagian dari proses manajemen aset yang berkelanjutan. Dalam konteks unit pembangkitan gas turbin seperti TM2500, setiap perubahan strategi harus dibuktikan dengan hasil teknis dan justifikasi finansial yang komprehensif.

Penelitian ini bertujuan menjawab pertanyaan utama: apakah CBM dapat memberikan keuntungan teknis dan finansial yang signifikan dibanding TBM? Untuk menjawabnya, digunakan metode analisis berjenjang dengan validasi berbasis data dan standar industri.

Dengan kerangka ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan kontribusi nyata bagi praktik pemeliharaan strategis pada sistem pembangkitan di Indonesia, khususnya dalam konteks efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan aset kritikal.

3.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek utama dalam penelitian ini adalah unit pembangkit TM2500 Gen4 SAC yang dimiliki dan dioperasikan oleh PT PLN Batam, serta tersebar di sembilan lokasi strategis. Unit-unit tersebut mencakup lokasi di Bangka, Belitung, Duri, Tarahan Lampung, Pontianak, Suppa, Tello, Punagaya, dan Lombok.

Masing-masing lokasi memiliki konfigurasi teknis dan mode operasi yang seragam karena unit TM2500 dirancang dengan pendekatan modular dan roll-in roll-out system. Hal ini memungkinkan penelitian fokus pada satu jenis mesin, namun tetap mendapatkan representasi kondisi lapangan dari berbagai lokasi.

Pemilihan PT PLN Batam didasarkan pada akses data operasional dan historis yang lengkap, termasuk catatan borescope inspection, laporan pemeliharaan, dan histori penggantian suku cadang. Selain itu, terdapat praktik implementasi CBM pada beberapa unit yang memungkinkan perbandingan langsung dengan strategi TBM.

Ketersediaan unit-unit dengan TRH >12.500 jam, dan hasil BSI yang terdokumentasi menjadi nilai tambah karena penelitian membutuhkan dasar teknis sebagai input utama analisis CBM. Selain faktor teknis, aspek organisasi juga menjadi pertimbangan. PT PLN Batam telah menerapkan sistem manajemen pemeliharaan berbasis standar OEM, yang menjadikan hasil penelitian dapat ditindaklanjuti dan diintegrasikan dalam kebijakan operasional.

Penelitian ini juga mendukung agenda efisiensi dan transformasi efisiensi dalam pelaksanaan pemeliharaan di sektor pembangkitan, karena menggunakan data aktual lapangan serta mendukung pengambilan keputusan strategis berbasis data. Dengan objek dan lokasi penelitian yang memiliki kejelasan data dan proses teknis yang kuat, diharapkan hasil penelitian ini akan memberikan rekomendasi yang dapat diimplementasikan pada skala nasional.

3.3 Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini memanfaatkan dua jenis data utama, yaitu data primer dan data sekunder. Penggunaan kombinasi ini dimaksudkan agar analisis yang dilakukan bersifat triangulatif, yaitu menggabungkan berbagai sudut pandang dan sumber informasi untuk meningkatkan akurasi hasil. Data yang dikumpulkan berhubungan dengan aspek teknis dan ekonomis dari pemeliharaan turbin gas TM2500.

Data primer diperoleh langsung dari observasi lapangan dan interaksi dengan pihak yang terlibat dalam pengelolaan unit TM2500. Data ini meliputi hasil monitoring parameter teknis dari engine yang telah beroperasi, log sheet operasional harian, dan dokumentasi hasil borescope inspection (BSI). Parameter seperti T48 (temperatur gas buang), PS3 (tekanan discharge), vibrasi, serta efisiensi termal menjadi bagian penting dari data ini.

Data sekunder dikumpulkan dari dokumen resmi perusahaan dan referensi ilmiah. Data sekunder termasuk laporan overhaul sebelumnya, dokumen perencanaan strategi pemeliharaan, standar OEM dari General Electric (GE), serta referensi dari jurnal ilmiah seperti Mishan & Quah (2007) untuk dasar teori Cost Benefit Analysis (CBA). Literatur ini melengkapi data teknis dengan kerangka analisis teoritis. Untuk memberikan pemetaan yang jelas mengenai ragam informasi yang digunakan dalam analisis ini, rincian klasifikasi jenis dan sumber data, baik primer maupun sekunder, dirangkum dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Tabel Klasifikasi Data Primer dan Sekunder

NO.	JENIS DATA	SUMBER	DESKRIPSI
1	Data Primer	Observasi Lapangan	Data hasil Borescope Inspection (BSI) dari unit TM2500. Data realisasi biaya overhaul per unit TM2500 selama 5 tahun terakhir di PLN Batam.
		Monitoring Operasional	Parameter teknis: temperatur gas buang (T48), tekanan discharge

			kompresor (PS3), getaran aksial dan radial
2	Data Sekunder	Laporan Internal	Laporan overhaul, histori pemeliharaan, dokumen strategi pemeliharaan PLN Batam
		Standar OEM	General Electric Operation & Maintenance Manual untuk TM2500
		Literatur Akademik	Teori Cost Benefit Analysis (CBA) dan referensi jurnal terkait strategi pemeliharaan

Penggunaan data historis dari unit TM2500 yang telah menjalani siklus overhaul baik berbasis TBM maupun CBM memungkinkan dilakukan perbandingan langsung antara kedua strategi tersebut. Selain itu, dokumen pengadaan suku cadang dan biaya transportasi modul hot section juga menjadi bagian dari data sekunder yang krusial dalam menghitung nilai keekonomian dari strategi CBM.

Kualitas data dijamin dengan melakukan validasi silang antara data primer dan sekunder. Misalnya, hasil wawancara teknis diverifikasi dengan dokumen BSI dan rekam pemeliharaan historis. Langkah ini penting untuk memastikan keabsahan data yang digunakan dalam analisis. Seluruh data dikumpulkan dengan mempertimbangkan kerahasiaan dan integritas informasi. Peneliti memastikan bahwa setiap data yang dikutip telah mendapatkan izin akses dari pihak terkait dan digunakan untuk kepentingan akademik semata.

Dengan pemanfaatan data yang beragam dan validasi metodologis yang kuat, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kelayakan implementasi CBM di unit TM2500 secara teknis dan finansial.

3.4 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu analisis teknis dan analisis ekonomi. Keduanya saling melengkapi

dan dirancang untuk menjawab pertanyaan penelitian mengenai efektivitas implementasi CBM dibandingkan dengan TBM pada unit TM2500.

Pada sisi analisis teknis, evaluasi dilakukan terhadap parameter performa mesin seperti T48, PS3, getaran, dan efisiensi termal. Data parameter tersebut dianalisis untuk mengetahui pola degradasi komponen, keandalan sistem, serta efektivitas CBM dalam memperpanjang masa operasi unit. Analisis ini dilakukan dengan bantuan software spreadsheet dan pengolahan grafik tren performa.

Hasil *Borescope Inspection (BSI)* juga dijadikan acuan utama dalam analisis teknis. Peneliti mengevaluasi dokumentasi BSI seperti kondisi blade, nozzle, dan chamber untuk mengkorelasikan visual kerusakan dengan data parameter operasional. Proses ini penting untuk memverifikasi apakah keputusan menunda overhaul berdasarkan BSI terbukti valid secara performa dan keselamatan operasi. Di sisi lain, analisis ekonomi dilakukan menggunakan pendekatan Cost Benefit Analysis (CBA). Metode ini bertujuan menghitung nilai keekonomian dari penerapan strategi CBM. Perhitungan NPV (Net Present Value) dan IRR (Internal Rate of Return) digunakan sebagai indikator utama kelayakan finansial. Formula NPV yang digunakan adalah:

$$NPV = \sum (Bt - Ct) / (1 + r)^t \quad \text{Persamaan 3 (3.1)}$$

Dengan:

Bt = manfaat pada tahun ke- t

Ct = biaya pada tahun ke- t

r = tingkat diskonto

t = tahun ke- n

IRR dihitung dengan mencari tingkat diskonto yang menjadikan $NPV = 0$. Jika IRR lebih besar dari cost of capital, maka strategi CBM dianggap layak secara finansial. Perhitungan ini menggunakan data biaya overhaul, biaya BSI, downtime cost, serta estimasi pendapatan tambahan dari peningkatan availabilitas unit.

Untuk melengkapi analisis, dilakukan pula analisis sensitivitas terhadap perubahan variabel penting seperti nilai tukar dolar, harga sparepart, dan durasi downtime. Ini bertujuan menilai ketahanan model ekonomi terhadap fluktuasi eksternal. Dengan pendekatan analisis berlapis ini, keputusan strategis mengenai

pemilihan metode pemeliharaan dapat dibuat dengan dasar yang kuat secara teknis dan ekonomis [21].

Untuk mendukung analisis teknis dan ekonomis dalam penelitian ini, disusun tabel data realisasi pelaksanaan overhaul unit TM2500 di lingkungan PT PLN Batam selama lima tahun terakhir. Tabel ini memuat informasi terkait lokasi unit, strategi pemeliharaan (TBM/CBM), biaya aktual, hasil borescope inspection, serta parameter efisiensi operasional. Data ini menjadi dasar dalam perhitungan Cost Benefit Analysis (CBA) untuk mengevaluasi kelayakan penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) dibandingkan dengan Time-Based Maintenance (TBM).

Dalam penelitian ini, dikembangkan sebuah formulasi baru untuk memperhitungkan potensi penghematan operasional yang dihasilkan akibat keberhasilan penundaan overhaul melalui penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM). Formulasi ini didasarkan pada prinsip fundamental dalam Cost Benefit Analysis (CBA) yang dinyatakan oleh Mishan & Quah (2007), yakni bahwa seluruh manfaat ekonomi, baik berupa pendapatan tambahan, penghematan biaya, maupun penghindaran kerugian operasional, harus diestimasi dan dimasukkan dalam evaluasi kelayakan finansial.

Pada umumnya, CBA dalam konteks strategi pemeliharaan hanya mempertimbangkan perbandingan antara biaya langsung pemeliharaan dan manfaat teknis seperti peningkatan keandalan sistem (Pranowo, 2019). Namun, dalam konteks unit pembangkitan modular TM2500 yang beroperasi pada isolated grid, terdapat peluang finansial nyata berupa pendapatan tambahan akibat keberlanjutan operasi unit tanpa intervensi overhaul yang tidak diperlukan secara teknis. Peluang ini jarang dikaji secara eksplisit dalam literatur terdahulu.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan formulasi Perhitungan penghematan sederhana namun aplikatif untuk menghitung potensi penghematan sebagai berikut:

$$\text{Potensi Penghematan} = \text{Durasi Penundaan} \times \text{Pendapatan Bulanan}$$

Persamaan 4 (3.4)

Dimana:

- Durasi Delay (bulan) diukur dari selisih waktu tambahan operasi unit setelah melampaui ambang batas Total Running Hour (TRH) standar TBM (12.500 jam).
- Pendapatan Rata-rata per Bulan (Rp) dihitung berdasarkan estimasi output listrik unit TM2500 dikalikan tarif jual listrik aktual yang berlaku di sistem isolated grid.

Pendekatan ini juga sejalan dengan prinsip *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) yang disarankan dalam ISO 14224:2016, yaitu mempertimbangkan kinerja aktual peralatan dan risiko operasional dalam perencanaan strategi pemeliharaan, serta prinsip optimasi manfaat ekonomi berbasis data keandalan.

Dengan memasukkan komponen potensi penghematan ini ke dalam perhitungan *Net Present Value* (NPV) dan *Internal Rate of Return* (IRR), maka analisis keekonomian penerapan CBM pada unit TM2500 tidak hanya mempertimbangkan efisiensi biaya langsung, tetapi juga kontribusi terhadap optimalisasi revenue operasional. Hal ini memberikan dimensi evaluasi yang lebih komprehensif dan kontekstual terhadap keputusan strategis pemeliharaan pembangkitan berbasis kondisi.

Untuk mendukung analisis teknis dan ekonomis dalam penelitian ini, disusun tabel data realisasi pelaksanaan overhaul unit TM2500 di lingkungan PT PLN Batam selama lima tahun terakhir. Tabel ini memuat informasi terkait lokasi unit, strategi pemeliharaan (TBM/CBM), biaya aktual, hasil borescope inspection, serta parameter efisiensi operasional. Data ini menjadi dasar dalam perhitungan Cost Benefit Analysis (CBA) untuk mengevaluasi kelayakan penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) dibandingkan dengan Time-Based Maintenance (TBM). Contoh hasil yang diharapkan dari rencana penelitian kajian penerapan CBM pada overhaul TM2500 PLN Batam disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Contoh Outcome rencana Penelitian kajian penerapan CBM pada Overhaul TM2500 PLN Batam

No	Lokasi	Nama Unit	TRH HSM	TRH Compressor	TRH PT	EFSC	Fuel	Standar BSI	Standar HSR	Biaya BSI acuan 2018	Biaya HSR 2018	x BSI mengacu TBM	x HSR mengacu TBM	Total Biaya BSI	Total Biaya HSR
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															

Manfaat ekonomi dalam penelitian ini dibatasi secara ketat hanya pada pengurangan biaya pemeliharaan langsung (Direct Cost Avoidance) melalui penundaan overhaul atau HSR yang diestimasikan sebesar USD 2.500.000 per unit. Analisis ini tidak memperhitungkan variabel degradasi kinerja GT akibat penundaan (seperti perubahan heat rate atau efisiensi spesifik bahan bakar) guna menjaga objektivitas nilai penghematan biaya kapital murni

3.5 Urutan pelaksanaan assesment CBM

1. Tahap 1: Pengawasan Parameter Makro (Lapis Pertama)

Proses dimulai dengan monitoring kontinu terhadap tren parameter termodinamika dan mekanikal primer secara real-time melalui sistem SCADA dan PLC GE RX3i. Parameter utama yang dipantau meliputi temperatur gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), dan tingkat vibrasi aksial/radial. Batas operasional vibrasi yang diijinkan mengacu pada standar GE, yaitu ≤ 3 mm/s.

2. Tahap 2: Evaluasi Pemicu (Trigger Analysis)

Analisis lebih dalam dilakukan ketika unit mencapai ambang batas administratif Time-Based Maintenance (TBM) konvensional, yaitu 12.500 jam Total Running Hour (TRH). Selain TRH, dilakukan evaluasi terhadap akumulasi siklus termal melalui Equivalent Full Service Cycle (EFSC) untuk mengukur tingkat "stres" material akibat frekuensi start-stop.

3. Tahap 3: Validasi Visual melalui Borescope Inspection (Lapis Utama)

Jika parameter operasional stabil namun unit telah mencapai ambang TRH, dilakukan Borescope Inspection (BSI) sebagai validator teknis tertinggi atau "The Gatekeeper". Tim teknis menggunakan kamera optik fleksibel untuk memeriksa kondisi fisik komponen internal hot section seperti combustion liner, fuel nozzle, dan turbine blades tanpa pembongkaran mesin.

4. Tahap 4: Klasifikasi Kondisi dan Pengambilan Keputusan

Hasil temuan visual dari BSI diklasifikasikan berdasarkan standar kriteria kerusakan pabrikan dalam dokumen GEK 112859. Keputusan dibagi menjadi dua status biner:

1. Serviceable (Laik Operasi): Jika kerusakan fisik masih dalam batas toleransi, unit diberikan perpanjangan masa pakai (Life Extension) melampaui jadwal TBM.
2. Not Serviceable (Wajib Perbaikan): Jika ditemukan kerusakan kritis seperti retakan (crack) atau burn marks, unit wajib segera menjalani overhaul atau Hot Section Replacement (HSR).

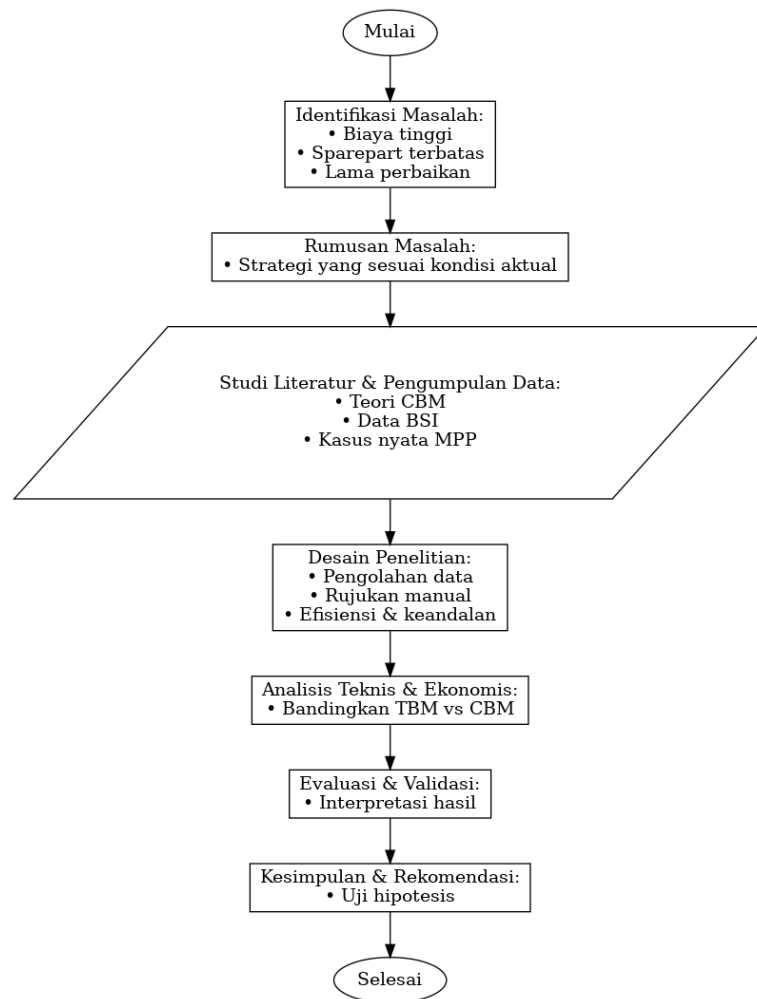
5. Tahap 5: Protokol Pemantauan Intensif

Unit yang dinyatakan serviceable dan mendapatkan life extension masuk ke dalam protokol pengawasan lebih ketat. Rekomendasi OEM menetapkan bahwa inspeksi visual ulang (BSI) wajib dilakukan setiap interval 4.000 jam operasi tambahan atau 450 kali start untuk menjamin keamanan aset secara berkelanjutan.

Strategi urutan ini memastikan bahwa keputusan penundaan overhaul memiliki landasan teknis yang sah dan aman, sehingga mampu menghasilkan penghematan biaya pemeliharaan sebesar USD 5.614.431 per tahun

3.6 Flowchart Metodologi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan tahap identifikasi masalah, di mana ditemukan bahwa biaya pemeliharaan unit pembangkit TM2500 cukup tinggi, ditambah dengan keterbatasan ketersediaan suku cadang serta lama waktu tunggu perbaikan. Permasalahan ini menjadi titik awal perlunya strategi pemeliharaan yang lebih adaptif terhadap kondisi nyata di lapangan. Alur langkah-langkah metodologi penelitian ini disajikan pada gambar berikut.



Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah, perumusan masalah, studi literatur dan pengumpulan data, desain penelitian, analisis teknis dan ekonomis, evaluasi dan validasi hasil, hingga penyusunan kesimpulan dan rekomendasi strategi pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) pada unit TM2500 di PT PLN Batam.

Berdasarkan kondisi tersebut, dirumuskan permasalahan utama penelitian, yakni bagaimana merancang strategi pemeliharaan yang sesuai dengan keterbatasan yang ada, tanpa mengorbankan keandalan operasional pembangkit. Fokus diarahkan pada perbandingan antara metode time-based maintenance (TBM) yang bersifat konvensional, dan pendekatan condition-based maintenance (CBM) yang dinilai lebih fleksibel dan berbasis data.

Selanjutnya, dilakukan studi literatur dan pengumpulan data, mencakup landasan teoritis mengenai CBM, laporan hasil *Borescope Inspection (BSI)* dari berbagai unit MPP, serta data parameter operasi aktual. Penelitian juga memanfaatkan studi kasus penerapan CBM yang telah dilakukan di beberapa unit MPP sebagai bahan analisis perbandingan.

Tahap berikutnya adalah desain penelitian, yaitu bagaimana data-data yang telah dikumpulkan dikelola dan dianalisis. Rujukan utama tetap mengacu pada manual pemeliharaan OEM (GE), sehingga rekomendasi strategi tetap relevan secara teknis. Tujuan dari tahap ini adalah menghasilkan sistem pemeliharaan yang meningkatkan efisiensi, keandalan, dan efektivitas biaya.

Selanjutnya dilakukan analisis teknis dan ekonomi. Pada bagian ini, dilakukan evaluasi kuantitatif terhadap perbedaan biaya dan manfaat antara metode TBM dan CBM, menggunakan alat analisis seperti Cost-Benefit Analysis (CBA) dan parameter teknis lainnya.

Setelah analisis dilakukan, masuk pada tahap evaluasi dan validasi, yakni melakukan interpretasi hasil untuk menilai kelayakan dan implementabilitas strategi CBM berdasarkan kondisi aktual unit TM2500 di PT PLN Batam.

Tahap terakhir adalah kesimpulan dan rekomendasi, yang mencakup pengujian hipotesis awal serta pemberian rekomendasi strategis mengenai strategi pemeliharaan terbaik yang dapat diterapkan secara berkelanjutan di unit MPP, khususnya dalam konteks efisiensi dan optimalisasi biaya operasi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian

4.1.1 Deskripsi unit TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam

Turbin gas TM2500 merupakan sistem pembangkit daya berbasis teknologi aero-derivatif yang dikembangkan oleh General Electric (GE), dengan inti mesin (core engine) yang diadaptasi dari mesin jet CF6-80C2—suatu mesin turbofan berperforma tinggi yang telah teruji dan banyak digunakan pada pesawat komersial seperti Boeing 747, 767, dan Airbus A310. Teknologi aero-derivatif ini memungkinkan pemanfaatan karakteristik mesin pesawat, seperti rasio daya terhadap berat yang tinggi, efisiensi termal unggul, serta kemampuan start-up yang sangat cepat, ke dalam konteks pembangkitan energi listrik di darat. Adaptasi dari CF6-80C2 mencakup sistem kompresor aksial multi-stage, combustion chamber bertipe annular, serta turbin tekanan tinggi dan rendah yang disesuaikan untuk pengoperasian berkelanjutan di lingkungan sistem pembangkitan listrik.

Lebih lanjut, arsitektur TM2500 dirancang dengan mempertahankan prinsip modularitas dan mobilitas tinggi. Mesin turbin yang berasal dari platform kedirgantaraan tersebut dipasangkan dengan generator dan sistem kontrol canggih dalam bentuk unit trailer yang dapat dipindahkan lintas lokasi. Desain ini memungkinkan TM2500 menjadi solusi pembangkitan yang ideal bagi sistem kelistrikan dengan karakteristik isolated grid atau kebutuhan darurat. Konfigurasi teknis tersebut tidak hanya mendukung fleksibilitas dalam instalasi dan pengoperasian, tetapi juga mempermudah penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi, khususnya melalui pemantauan parameter operasional dan hasil inspeksi visual non-destruktif.

Unit TM2500+ dikemas dalam format mobile trailer yang terdiri atas tiga modul utama: Turbine Package, Generator Package, dan Control House Package. Masing-masing modul didesain secara terstandarisasi dan terintegrasi dengan sistem pendukung seperti fuel treatment system, fire protection aerosol system (Stat-X), variable geometry (VG) untuk optimasi airflow, serta sistem pelumasan mandiri. Struktur modular ini

memungkinkan unit TM2500 untuk dikirim, dipasang, dan dioperasikan dalam waktu kurang dari 11 hari sejak kedatangan di lokasi, sebagaimana tercantum dalam dokumen OEM GE Operation Manual. Fleksibilitas ini sangat penting dalam konteks ketenagalistrikan nasional yang menghadapi tantangan geografis dan keterbatasan infrastruktur di wilayah kepulauan atau remote area. Untuk memberikan gambaran teknis yang mendalam mengenai unit yang menjadi objek studi ini, rincian spesifikasi TM2500+ Gen4 SAC dirangkum pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi TM 2500+ PT PLN Batam

No.	Parameter	Spesifikasi	Uraian Teknis
1	Model Mesin	TM2500+ Gen4 SAC	Model mesin turbin gas mobile berbasis aero-derivatif dari CF6-80C2 GE Aviation.
2	Tipe Bahan Bakar	Dual Fuel (HSD/BBG)	Mampu menggunakan bahan bakar minyak (HSD) maupun gas (BBG), menyesuaikan ketersediaan bahan bakar.
3	Kapasitas Daya (ISO)	26–32 MW	Output daya nominal tergantung kondisi site dan altitude; optimal di $\pm$ ISO condition.
4	Teknologi Kompresor	17-stage axial compressor	Kompresor aksial bertingkat untuk meningkatkan tekanan udara masuk sebelum pembakaran.
5	Teknologi Combustor	Single Annular Combustor (SAC)	Sistem pembakaran seragam untuk efisiensi dan emisi rendah, cocok untuk isolated grid.

6	Konfigurasi Turbin	2-stage High Pressure Turbine + 2-stage Power Turbine	Dirancang untuk efisiensi konversi energi dan fleksibilitas start-stop tinggi.
7	Sistem Pendinginan	Air-cooled & Oil-cooled System	Menggunakan kombinasi sistem pendinginan udara dan oli untuk menjaga suhu kerja aman.
8	Waktu Start-up	<10 menit (cold start hingga sinkron)	Start cepat dari kondisi dingin ke mode sinkronisasi, ideal untuk respon cepat sistem.
9	Efisiensi Termal (Simple Cycle)	≈36% (ISO simple cycle)	Efisiensi termal pada mode siklus sederhana, tipikal turbin open cycle.
10	Tekanan PS3 (Discharge)	≈180–200 psia	Tekanan discharge pada akhir kompresor, salah satu indikator performa sistem.
11	Temperatur T48 (Exhaust)	≈540–560°C	Temperatur gas buang digunakan untuk monitoring efisiensi dan deteksi degradasi.
12	Sistem Monitoring	SCADA + Rx3i PLC (GE Control System)	Sistem monitoring real-time, mendukung implementasi CBM dan kontrol berbasis kondisi.
13	Jenis Trailer	Turbine, Generator, dan Control House Trailer	Unit modular pada trailer memungkinkan fleksibilitas mobilisasi dan instalasi.

14	Sistem Kontrol	HMI berbasis RX3i GE, terintegrasi SCADA	Sistem kontrol digital dari GE memungkinkan otomasi dan integrasi monitoring.
15	Vibrasi Batas Operasional	≤ 3 mm/s (GE Standard)	Batas getaran operasi untuk menjaga kestabilan mekanis dan mencegah kegagalan komponen.
16	Speed Drop	$\leq 4\%$	Menunjukkan sensitivitas governor terhadap perubahan beban, penting untuk kestabilan frekuensi
17	Isochronous Load Sharing	Ya	Memungkinkan pembagian beban otomatis tanpa deviasi kecepatan antara unit paralel

Seluruh operasi dan monitoring unit TM2500 dikendalikan melalui sistem Programmable Logic Controller (PLC) RX3i yang terhubung dengan antarmuka Human Machine Interface (HMI). Sistem ini memungkinkan pengawasan secara real-time terhadap parameter-parameter vital seperti gas generator speed (NGG), power turbine speed (NPT), exhaust gas temperature (T48), compressor discharge pressure (PS3), getaran aksial/radial, dan thermal efficiency. Fitur ini secara strategis mendukung implementasi Condition-Based Maintenance (CBM) karena menyediakan data historis dan diagnostik operasional yang menjadi dasar pengambilan keputusan berbasis kondisi aktual, bukan sekadar akumulasi jam operasi sebagaimana pada pendekatan Time-Based Maintenance (TBM).

Dengan seluruh fitur teknis tersebut, TM2500 Gen4 SAC bukan hanya menjadi solusi pembangkitan temporer atau darurat, tetapi juga berkembang menjadi komponen utama dalam strategi keandalan sistem kelistrikan berbasis modular. Integrasinya dengan standar pemeliharaan OEM dan kecocokannya terhadap pendekatan data-driven asset management menjadikan TM2500 sebagai role model bagi modernisasi sistem pembangkitan gas turbin di Indonesia.

4.1.2 Distribusi lokasi unit (20 unit di 9 lokasi MPP)

PT PLN Batam mengoperasikan 20 unit TM2500 Gen4 SAC yang tersebar di sembilan lokasi strategis di Indonesia, dengan peran utama sebagai pembangkit cadangan cepat (fast-track power generation) dalam sistem kelistrikan yang bersifat isolated, semi-isolated, maupun sistem dengan beban puncak yang fluktuatif. Pola distribusi ini tidak hanya mempertimbangkan kebutuhan regional atas keandalan pasokan daya, tetapi juga fleksibilitas teknis dalam menghadapi gangguan jaringan, keterbatasan kapasitas base load, dan kebutuhan respon cepat dalam mendukung kontinuitas layanan publik di daerah.

Unit TM2500 yang dioperasikan memiliki arsitektur modular, memungkinkan skema roll-in roll-out, yaitu perpindahan unit antar lokasi secara cepat tanpa perlu membangun infrastruktur permanen yang memakan waktu dan biaya. Dengan teknologi berbasis turbin aero-derivatif, unit TM2500 mampu melakukan start-up dalam waktu kurang dari 10 menit dan menyuplai daya hingga 32 MW (ISO), menjadikannya ideal untuk intervensi cepat di sistem kelistrikan dengan keandalan rendah atau sistem yang mengalami defisit kapasitas.

Tabel berikut menunjukkan distribusi geografis dan fungsi strategis dari masing-masing lokasi:

Tabel 4.2 Sebaran Unit Pembangkit TM 2500 + PT PLN Batam

No	Lokasi MPP	Jumlah Unit TM2500	Fungsi Strategis
1	Air Anyir (Bangka)	4 Unit	Penopang isolated grid dan stabilisasi sistem pulau
2	Tarahan (Lampung)	1 Unit	Peaker berbahan bakar gas (BBG), cadangan dalam sistem interkoneksi
3	Jeranjang (Lombok)	2 Unit	Pendukung operasi sistem Lombok, backup gangguan transmisi

4	Suppa (Sulsel)	2 Unit	Penyeimbang daya fluktuatif dan pengisi kekosongan base load regional
5	Tello (Makassar)	2 Unit	Menangani beban puncak harian dan gangguan sistem
6	Punagaya (Sulsel)	1 Unit	Dukungan sistem isolated kecil dan penyelamat beban puncak
7	Balai Pungut (Riau)	2 Unit	Sistem isolated pada jaringan distribusi Riau dan Pekanbaru
8	Parit Baru (Pontianak)	4 Unit	Penyangga keandalan sistem Kalbar dan mendukung kebutuhan mendesak
9	Gunung Sitoli (Nias)	1 Unit	Sumber daya utama isolated grid Nias

Dalam kerangka pemeliharaan, distribusi ini memungkinkan PLN menerapkan strategi fleet-based condition monitoring, yaitu pelaksanaan Condition-Based Maintenance (CBM) lintas lokasi dengan referensi parameter operasional yang seragam. Sebagai contoh, unit yang mengalami kenaikan temperatur T48 dan tekanan PS3 abnormal dapat ditindaklanjuti di lokasi terdekat oleh tim ahli mobile, sementara unit dengan TRH tinggi tetapi hasil Borescope Inspection (BSI) masih laik dapat diprioritaskan untuk perpanjangan masa operasi.

Keberadaan unit TM2500 di sembilan lokasi ini menunjukkan adopsi strategi resilien pembangkitan nasional, di mana penguatan sistem energi tidak semata-mata berbasis pembangkit tetap, tetapi juga mengandalkan aset-aset mobile yang adaptif, efisien, dan terukur dari sisi pemeliharaan dan biaya operasional. Hal ini semakin relevan dengan arah kebijakan PLN menuju Net Zero Emission 2060 yang menekankan efisiensi, fleksibilitas, dan manajemen aset berbasis data.

4.1.3 Arsitektur sistem modular dan skema roll-in roll-out

Konfigurasi sistem turbin gas TM2500 Gen4 SAC yang dioperasikan oleh PT PLN Batam dirancang secara eksplisit untuk mengakomodasi kebutuhan pembangkitan energi listrik dengan mobilitas tinggi, instalasi cepat, serta fleksibilitas dalam pemeliharaan dan operasional antar wilayah, khususnya di sistem kelistrikan berkarakter isolated dan rentan gangguan. Konsep arsitektur modular pada unit ini merupakan wujud konkret dari strategi manajemen aset kontemporer yang menekankan aspek skalabilitas, adaptabilitas, dan efisiensi logistik dalam tata kelola pembangkitan darurat maupun temporer [21].

Secara teknis, setiap unit TM2500 terdiri atas tiga struktur utama yang dibangun dalam bentuk trailer independen, yaitu:

- 1) Turbine Trailer: Menampung inti turbin gas aero-derivatif GE LM2500+, lengkap dengan kompresor aksial 17-stage, ruang bakar tipe Single Annular Combustor (SAC), dan power turbine dua tahap. Trailer ini didesain untuk meminimalkan footprint, sekaligus memfasilitasi proses transportasi yang cepat dan efisien antar lokasi melalui moda laut atau darat.
- 2) Generator Trailer: Menyatu dengan sistem sinkronisasi generator dan transformator output (GSUT dan UAT), yang siap disambungkan ke sistem grid melalui panel distribusi utama (main distribution panel), mendukung kemampuan islanding maupun grid-tied dengan fleksibilitas sistem voltase 6,6–11 kV.
- 3) Control House Trailer: Berisi sistem kendali berbasis GE RX3i PLC dan antarmuka Human Machine Interface (HMI), memungkinkan kontrol parameter operasional secara real-time, termasuk integrasi ke sistem SCADA PLN. Trailer ini juga menjadi pusat pemantauan kondisi sistem, alarm, dan pengamanan unit.

Ciri khas utama dari arsitektur modular ini adalah kemampuannya untuk menjalankan skema Roll-In Roll-Out (RIRO). Skema ini memberikan keleluasaan kepada operator untuk melakukan rotasi unit antar lokasi tanpa membutuhkan rekayasa sipil permanen. Hal ini secara signifikan mengurangi lead-time pemulihan pasokan daya pada lokasi terdampak gangguan, serta menurunkan Total Cost of Ownership (TCO) dalam pengelolaan pembangkitan temporer. Skema RIRO juga memberikan ruang strategi

mengalami keausan signifikan pada ambang waktu overhaul yang ditetapkan secara konservatif.

Melalui implementasi sistem pemantauan parameter real-time—seperti exhaust temperature (T48), discharge pressure (PS3), serta sensor vibrasi aksial dan radial—unit TM2500 kini memiliki kemampuan untuk mengadopsi strategi Condition-Based Maintenance (CBM) secara progresif. Pendekatan ini semakin diperkuat oleh hasil Borescope Inspection (BSI), yang telah dikembangkan sebagai metode visual non-destruktif untuk mengevaluasi kelayakan komponen kritis secara langsung.

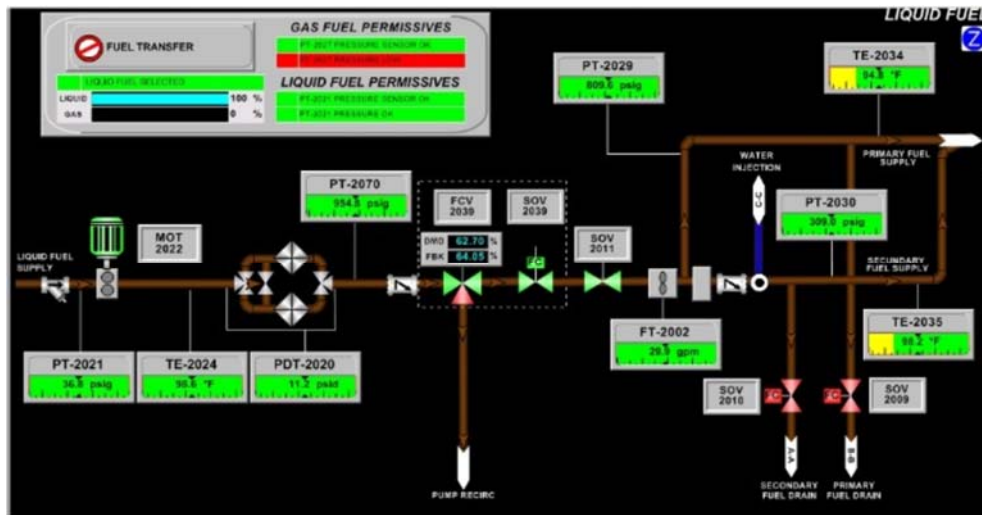
Secara eksplisit, OEM General Electric dalam dokumen teknis seperti GEK 112007 dan GER-3695E, menegaskan bahwa interval overhaul dapat disesuaikan dengan kondisi aktual unit berdasarkan hasil inspeksi dan tren parameter performa, bukan hanya berdasarkan perhitungan TRH. Pernyataan ini menjadi dasar legal dan teknis yang sah untuk transisi menuju CBM, sekaligus mengukuhkan bahwa CBM bukan semata pendekatan eksperimental, melainkan bagian dari filosofi pemeliharaan modern yang diakui oleh pabrikan.

Dengan kata lain, transisi dari TBM menuju CBM pada unit TM2500 tidak hanya logis secara teknis, namun juga selaras dengan praktik terbaik (best practice) dalam manajemen aset strategis. Penerapan CBM menjadi semakin relevan, mengingat seluruh unit telah beroperasi selama lebih dari satu dekade dan memiliki infrastruktur sensor yang cukup memadai untuk mendukung pendekatan berbasis kondisi secara sistematis dan akurat.

4.1.4 Jenis bahan bakar yang digunakan (HSD/BBG)

Unit turbin gas TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam dirancang dengan kemampuan dual fuel, yakni dapat beroperasi menggunakan High Speed Diesel (HSD) maupun Bahan Bakar Gas (BBG). Fleksibilitas bahan bakar ini menjadi karakteristik utama yang memungkinkan adaptabilitas tinggi terhadap dinamika pasokan energi primer, baik di wilayah isolated grid maupun sistem kelistrikan utama yang mengalami keterbatasan logistik distribusi gas.

Gambar 4.2 berikut menunjukkan visualisasi antarmuka sistem kontrol yang menangani manajemen operasional bahan bakar cair (HSD) pada unit di MPP Bangka ditampilkan pada

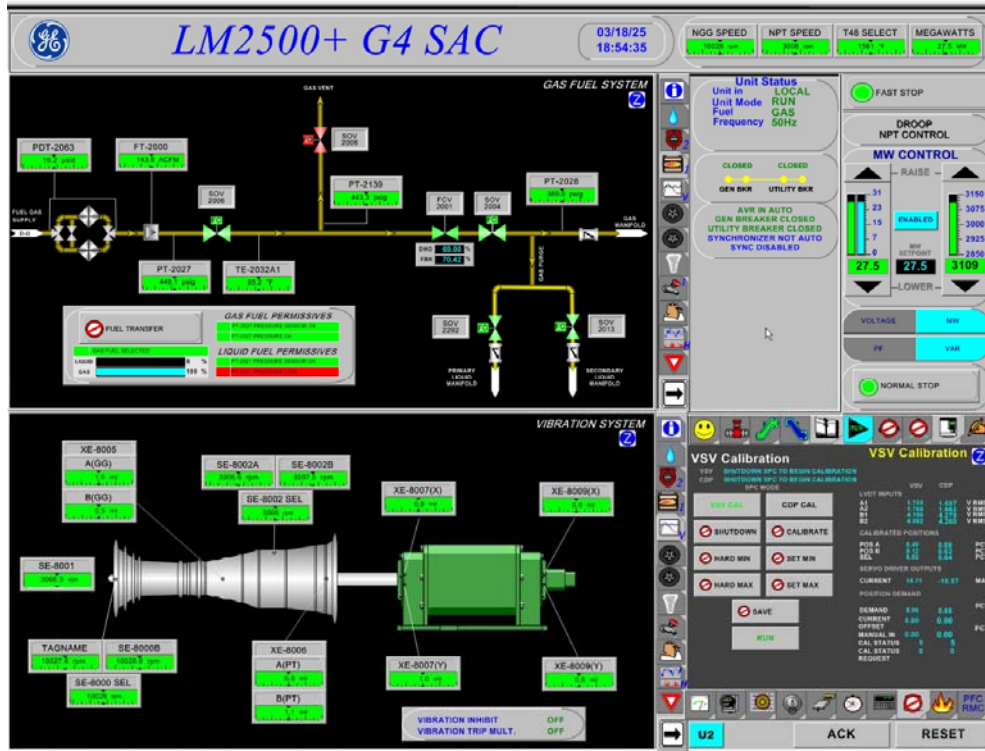


Gambar 4.2 HMI kontrol Bahan Bakar TM 1 MPP Bangka

High Speed Diesel (HSD) merupakan bahan bakar yang memiliki densitas dan viskositas relatif tinggi, dan digunakan secara luas di lokasi yang tidak terjangkau jaringan gas bumi. Proses pembakaran HSD dalam TM2500 berlangsung melalui sistem injeksi tekanan tinggi, di mana bahan bakar disemprotkan secara halus dan bercampur dengan udara bertekanan dari kompresor sebelum memasuki ruang bakar tipe Single Annular Combustor (SAC). Walau memiliki efisiensi pembakaran yang baik, HSD menghasilkan emisi partikulat dan SOx yang relatif lebih tinggi dibanding gas alam. Hal ini memerlukan pengelolaan yang cermat terhadap kebersihan nozzle, deposit karbon pada hot section, dan strategi pemeliharaan berbasis waktu maupun kondisi [25].

Penggunaan HSD sebagai bahan bakar utama masih mendominasi sebagian besar unit TM2500 di PLN Batam, terutama pada lokasi-lokasi seperti Air Anyir, Suge, Lombok, Suppa, Tello, dan Punagaya. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan infrastruktur jaringan gas serta kebutuhan untuk menjaga respon cepat terhadap permintaan beban puncak. Karakteristik pembakaran HSD yang stabil dan kemampuan start-up dalam waktu kurang dari 10 menit menjadikan bahan bakar ini sebagai pilihan andalan dalam kondisi krisis pasokan daya maupun kebutuhan balancing sistem.

Sebagai perbandingan, konfigurasi antarmuka sistem kontrol untuk unit yang beroperasi menggunakan mode Bahan Bakar Gas (BBG) di MPP Tarahan disajikan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 HMI kontrol Bahan Bakar Gas TM 2500 MPP Tarahan

Sebaliknya, penggunaan BBG (biasanya gas alam bertekanan menengah) menawarkan keuntungan berupa pembakaran yang lebih bersih, nilai kalor tinggi, dan efisiensi termal yang lebih baik. Komposisi dominan metana (CH_4) dalam BBG memberikan karakteristik pembakaran yang stabil, dengan suhu ruang bakar yang lebih terkendali dan residu karbon minimal. Hal ini berdampak langsung terhadap umur pakai komponen hot section dan efektivitas strategi Condition-Based Maintenance (CBM). Namun demikian, pengoperasian dengan BBG memerlukan infrastruktur suplai gas, sistem pressure regulation yang stabil, dan perlindungan terhadap fenomena flame-out atau knock saat terjadi fluktuasi tekanan [21]

Dalam konteks unit PLN Batam, terdapat pula unit seperti MPP Tarahan yang telah difasilitasi untuk beroperasi menggunakan gas alam (BBG). Penggunaan BBG memberikan keuntungan signifikan dalam hal biaya bahan bakar per kWh serta penurunan emisi karbon, yang sejalan dengan komitmen PT PLN dalam mencapai target

dekarbonisasi sebagaimana tercantum dalam RUPTL 2021–2030 dan roadmap Net Zero Emission 2060.

Secara teknis, sistem pembakaran Single Annular Combustor (SAC) pada TM2500 telah dioptimalisasi untuk menyokong kedua jenis bahan bakar tersebut melalui modifikasi fuel skid dan sistem kontrol injeksi otomatis. Perpindahan mode bahan bakar (fuel switchover) dapat dilakukan dengan gangguan minimal terhadap kestabilan operasi, karena sistem kontrol berbasis PLC Rx3i secara otomatis menyesuaikan profil injeksi dan pola pembakaran [14].

Ketersediaan data historis bahan bakar dan konsumsi spesifik (EFSC) pada masing-masing unit menunjukkan adanya perbedaan karakteristik efisiensi termal antara unit yang menggunakan HSD dan BBG. Rata-rata EFSC unit berbahan bakar HSD berkisar antara 1000–2000 liter per EFSC, sedangkan unit berbahan bakar gas umumnya menunjukkan nilai konsumsi yang lebih rendah dalam konteks SFC (Specific Fuel Consumption) per kWh output.

Dalam konteks implementasi CBM, jenis bahan bakar yang digunakan juga memengaruhi pola degradasi komponen—terutama pada hot section components seperti liner dan nozzle. Bahan bakar diesel, meskipun unggul dalam hal kemudahan logistik dan kestabilan pembakaran, cenderung menghasilkan deposit karbon lebih tinggi yang dapat mempercepat erosi dan fouling pada komponen turbin. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) harus memperhitungkan variabel ini dalam analisis Remaining Useful Life (RUL) komponen kritis [26].

Dengan demikian, fleksibilitas bahan bakar TM2500 tidak hanya memberikan keunggulan operasional, tetapi juga menuntut sistem monitoring yang presisi dan responsif untuk memastikan keandalan dan efisiensi jangka panjang. Pemilihan bahan bakar pada masing-masing lokasi TM2500 juga merepresentasikan strategi adaptasi teknis dan ekonomi PLN Batam dalam menjawab tantangan regionalisasi pasokan energi primer.

4.1.5 Deskripsi kondisi operasi masing-masing unit

Unit-unit TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam yang tersebar di sembilan lokasi strategis menunjukkan variasi kondisi operasi yang merepresentasikan tingkat

pemanfaatan, keandalan, serta urgensi pembangkitan pada masing-masing wilayah. Berdasarkan data operasional per tanggal 1–3 Mei 2025, seluruh unit memiliki status teknis dan administratif yang diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama: unit operasional (online), unit siaga (standby), dan unit tidak beroperasi (not standby).

Sebagai contoh, di lokasi PLTG MPP Air Anyir, terdapat empat unit TM2500 dengan tingkat jam operasi (Total Running Hour, TRH) yang tinggi dan masih aktif mendukung sistem kelistrikan dengan beban 13–18 MW per unit. Unit TM#1 di lokasi tersebut telah mencapai TRH Power Turbine (PT) sebesar 50.406,89 jam dan TRH Compressor sebesar 31.390,91 jam, menandakan penggunaan intensif dalam sistem kelistrikan isolated grid Bangka.

Sementara itu, unit TM#2 di PLTG MPP Tarahan menunjukkan akumulasi TRH PT sebesar 58.601,75 jam, menjadikannya salah satu unit dengan jam operasi tertinggi di antara seluruh armada TM2500. Namun, berdasarkan statusnya saat ini sebagai unit standby dengan bahan bakar gas (BBG), tekanan pada siklus operasinya telah menurun dan memberikan potensi sebagai kandidat evaluasi penundaan overhaul berbasis CBM.

Di sisi lain, unit-unit di PLTG MPP Parit Baru – Pontianak dan PLTG MPP Nias, menunjukkan TRH yang relatif rendah (<5.000 jam). Unit-unit ini mayoritas berstatus standby dengan EFSC (Equivalent Full Service Cycle) masih di bawah 600, menandakan kondisi yang relatif baru atau belum tereksplorasi secara maksimal. Hal ini penting dalam konteks perencanaan rotasi pemanfaatan unit dan strategi pemeliharaan jangka menengah.

Variabilitas kondisi TRH dan EFSC mencerminkan diversifikasi peran unit dalam mendukung kebutuhan sistem kelistrikan daerah. Beberapa unit dioperasikan secara baseload dan mengalami siklus operasi panjang, sedangkan yang lain difungsikan sebagai peaker plant atau backup system dalam frekuensi mode.

Pemahaman kondisi aktual ini menjadi penting sebagai prasyarat utama dalam strategi CBM, karena penundaan atau percepatan overhaul harus mengacu pada status keausan aktual dan indikator performa operasional yang tervalidasi melalui Borescope Inspection (BSI) dan sistem SCADA.

4.1.6 Ketersediaan dan cakupan data operasional

Penelitian ini memanfaatkan data operasional aktual dari dua puluh unit TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam yang tersebar di sembilan lokasi pembangkit modular (Mobile Power Plant/MPP), yaitu MPP Bangka, Belitung, Tarahan, Tello, Suppa, Punagaya, Jeranjang, Parit Baru, dan Nias. Setiap unit memiliki konfigurasi standar pabrikan General Electric (GE), sehingga memungkinkan pendekatan komparatif dalam analisis kondisi teknis dan efektivitas strategi pemeliharaan.

Data yang dikumpulkan mencakup parameter operasional utama yang menjadi indikator kesehatan mesin dan menjadi dasar implementasi Condition-Based Maintenance (CBM), yaitu:

1) Total Running Hour (TRH):

Data TRH diperoleh untuk tiga komponen kritis: kompresor, power turbine (PT), dan hot section module (HSM). Informasi ini penting untuk mengevaluasi usia pakai komponen dan potensi degradasi.

Unit-unit tertentu menunjukkan jam operasi kompresor dan PT yang telah melampaui ambang TBM standar (12.500 jam), sementara nilai TRH HSM bervariasi, menunjukkan bahwa beberapa unit telah menjalani penggantian modul secara parsial.

2) EFSC (Equivalent Full-Service Cycle):

Digunakan sebagai indikator jumlah siklus start mesin. Semakin tinggi EFSC, semakin besar frekuensi siklus termal yang dialami, yang dapat mempercepat keausan terutama pada hot section dan bearing.

Nilai EFSC diamati berkisar antara <100 pada unit-unit baru (Parit Baru), hingga >2.000 pada unit senior seperti TM2500 Tarahan.

3) Parameter Diagnostik Real-time:

1. T48 (Exhaust Gas Temperature): menjadi indikator utama efisiensi pembakaran dan integritas hot gas path. Peningkatan nilai T48 dapat mengindikasikan fouling, crack, atau deformasi pada nozzle dan blade turbin.
2. Tekanan PS3 (Compressor Discharge Pressure): digunakan untuk memantau efisiensi kompresi dan potensi degradasi pada compressor stator dan rotor blade.

3. Vibrasi Aksial dan Radial: diamati melalui sensor getaran terintegrasi dan dikorelasikan terhadap keseimbangan rotor serta kondisi bearing.
4. Efisiensi Termal: dihitung berdasarkan output daya netto dan input bahan bakar aktual; efisiensi ini penting sebagai acuan performa agregat unit dan deteksi dini anomali termal.
5. Data Borescope Inspection (BSI): Tersedia untuk sebagian besar unit dengan TRH >12.500 jam. Dokumentasi hasil BSI mencakup citra kondisi nozzle, liner, blade dan disk, serta rekomendasi kelayakan teknis dari engineer pabrikan (GE). BSI menjadi landasan utama dalam menentukan apakah unit masih serviceable atau perlu menjalani overhaul sesuai filosofi CBM.

4) Data Suplai dan Jenis Bahan Bakar:

Hampir seluruh unit menggunakan HSD (High Speed Diesel) dengan beberapa unit tertentu (Tarahan) yang menggunakan BBG (Bahan Bakar Gas). Data volume harian dan cadangan bahan bakar dihimpun untuk menghitung potensi pendapatan dan durasi operasi saat penundaan overhaul diterapkan.

Dengan cakupan data yang komprehensif dan terdokumentasi secara sistematis, penelitian ini memiliki dasar yang kuat untuk melakukan evaluasi teknis dan ekonomis terhadap implementasi CBM. Validitas data yang berasal dari parameter operasional langsung dan hasil BSI menjamin bahwa keputusan yang diambil dalam simulasi strategi pemeliharaan tidak bersifat asuntif, melainkan berbasis bukti dan kondisi aktual. Hal ini selaras dengan prinsip Reliability-Centered Maintenance sebagaimana diatur dalam ISO 14224:2016 dan filosofi pemeliharaan pabrikan GE dalam manual OEM.

4.2 Hasil Evaluasi Teknis Penerapan CBM

4.2.1 Rekapitulasi data parameter operasi aktual

Sebagai bagian dari upaya mengevaluasi kelayakan teknis penerapan strategi Condition-Based Maintenance (CBM) pada unit turbin gas TM2500 milik PT PLN Batam, dilakukan rekapitulasi menyeluruh terhadap parameter operasi aktual seluruh unit yang tersebar di sembilan lokasi Mobile Power Plant (MPP). Parameter yang dipantau mencakup Total Running Hour (TRH) untuk tiga komponen utama, yakni Compressor, Power Turbine (PT), dan Hot Section Module (HSM), serta parameter teknis pendukung

seperti temperatur gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), level vibrasi, dan nilai efisiensi spesifik bahan bakar (EFSC).

Rekapitulasi komprehensif mengenai kondisi aktual seluruh armada unit, yang mencakup data *Total Running Hour* (TRH) komponen kritis dan status bahan bakar, disajikan dalam Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 . Data Operational Unit MPP PLN Batam

<i>No</i>	<i>Lokasi</i>	<i>Nama</i> <i>Unit</i>	<i>TRH</i> <i>Compressor</i>	<i>TRH</i> <i>HSM</i>	<i>TRH PT</i>	<i>EFSC</i>	<i>Fuel</i>
1	PLTG	TM#1	47651,33	18495,9	47651,33	269	HSD
	MPP Tello						
2	PLTG	TM#2	31335,03	3756,49	31335,03	1739	HSD
	MPP Tello						
3	PLTG	TM#1	29246	12221	29246	1981	HSD
	MPP Jeranjang						
4	PLTG	TM#2	36909	2618	36909	1939	HSD
	MPP Jeranjang						
5	PLTG	TM#1	258,03	258,03	258,03	44	HSD
	MPP Punagaya						
6	PLTG	TM#1	22620,79	22620,79	22620,79	1341	HSD
	MPP Suppa						
7	PLTG	TM#2	24669,76	24669,76	24669,76	543	HSD
	MPP Suppa						
8	PLTG	TM#1	31390,91	9356,46	50406,89	1359	HSD
	MPP	Air					
	Anyir						

9	PLTG	TM#2	48712,46	1619,83	48712,46	1114	HSD
	MPP	Air					
	Anyir						
10	PLTG	TM#3	30198,9	19135,71	30198,9	1599	HSD
	MPP	Air					
	Anyir						
11	PLTG	TM#4	33949,31	18280,9	33949,31	1734	HSD
	MPP	Air					
	Anyir						
12	PLTG	TM#2	24980,41	24980,41	24980,41	1685	GAS
	MPP	Balai					
	Pungut						
13	PLTG	TM#3	47835	15801	47835	1496	GAS
	MPP	Balai					
	Pungut						
14	PLTG	TM#2	58601,75	21565,46	58601,75	2175	GAS
	MPP						
	Tarahan						
15	PLTG	TM#1	44130,06	28126,19	44130,06	1054	HSD
	MPP	Suge					
16	PLTG	TM#1	3322,55	3322,55	3322,55	538	HSD
	MPP	Parit					
	Baru						
17	PLTG	TM#2	2907,59	2907,59	2907,59	492	HSD
	MPP	Parit					
	Baru						
18	PLTG	TM#3	3295,43	3295,43	3295,43	508	HSD
	MPP	Parit					
	Baru						

19	PLTG	TM#4	4245,3	4245,3	4245,3	615	HSD
	MPP Parit						
	Baru						
20	PLTG	TM#1	21855,51	5069,64	21855,51	2669	HSD
	MPP Nias						

Tabel diatas menyajikan ringkasan kondisi operasi berdasarkan TRH Power Turbine (PT), TRH Compressor, TRH Hot Section Module (HSM), dan EFSC, yang menjadi dasar utama dalam penilaian kelayakan teknis penerapan CBM. Hasil rekapitulasi menunjukkan variasi signifikan dalam tingkat utilisasi masing-masing unit, yang dipengaruhi oleh faktor geografis, kebutuhan beban sistem, serta karakteristik operasional di masing-masing lokasi. Sebagai contoh, unit TM2500 di MPP Tarahan menunjukkan TRH PT mencapai lebih dari 58.000 jam, mendekati ambang batas overhaul mayor (50.000 jam) sebagaimana direkomendasikan oleh GE dalam dokumen GEK 112859. Sebaliknya, beberapa unit di lokasi seperti MPP Parit Baru dan MPP Punagaya masih mencatat TRH di bawah 5.000 jam, menandakan utilisasi rendah atau masih dalam fase early life cycle.

4.2.2 Hasil *Borescope Inspection* (BSI) untuk unit-unit studi kasus

Salah satu pilar utama dalam penerapan strategi *Condition-Based Maintenance* (CBM) pada unit TM2500 Gen4 SAC adalah *Borescope Inspection* (BSI). Pemeriksaan ini menjadi dasar pengambilan keputusan dalam menilai apakah komponen internal turbin gas masih dalam kondisi serviceable, atau memerlukan intervensi lebih lanjut berupa Hot Section Replacement (HSR) atau Major Overhaul (MOH). Mengacu pada dokumen GEK 112859 O&M Chapter 11 Preventive Maintenance, General Electric (GE) sebagai Original Equipment Manufacturer (OEM) menetapkan bahwa Borescope Inspection direkomendasikan dilakukan secara semi-tahunan, atau setiap 4.000 jam operasi atau 450 kali start, tergantung mana yang tercapai terlebih dahulu.

Untuk komponen hot section, interval pergantian atau inspeksi besar ditentukan berdasarkan jenis bahan bakar [27]:

- 25.000 jam untuk unit yang dioperasikan dengan bahan bakar gas (BBG),
- 12.500 jam untuk unit berbahan bakar solar (HSD).

Sementara itu, Major Overhaul (MOH) atau Depot Level 4 Inspection direkomendasikan setiap 50.000 jam operasi total. Interval waktu ini bukan bersifat absolut, melainkan sebagai estimasi awal yang dapat disesuaikan berdasarkan hasil BSI aktual. OEM menekankan bahwa nilai tersebut tidak menjamin kesesuaian jika diterapkan tanpa mempertimbangkan kondisi nyata operasi mesin, khususnya beban operasi dan temperatur buang maksimum (T48IN) pada base load.

Dengan demikian, peran BSI menjadi sangat sentral dalam model pemeliharaan berbasis kondisi. BSI tidak hanya berfungsi sebagai metode deteksi dini kerusakan (early fault detection), tetapi juga sebagai alat validasi ilmiah terhadap kebijakan pemeliharaan berbasis waktu (TBM). Dalam konteks penelitian ini, hasil BSI digunakan untuk membandingkan kelayakan penundaan overhaul pada unit-unit TM2500 di PLN Batam, serta menguji hubungan antara parameter operasional aktual dengan interval rekomendasi OEM.

4.2.3 Penilaian kelayakan teknis berdasarkan kondisi aktual

Dalam paradigma modern pengelolaan aset pembangkit listrik berbasis turbin gas, keputusan untuk melakukan overhaul tidak lagi semata-mata berlandaskan pada akumulasi waktu operasi (time-based), melainkan pada kondisi aktual mesin yang dievaluasi secara cermat melalui pendekatan Condition-Based Maintenance (CBM). Dalam konteks ini, pelaksanaan Borescope Inspection (BSI) menjadi elemen krusial untuk mengukur kelayakan teknis unit secara langsung, serta untuk mengidentifikasi sisa umur komponen atau Remaining Useful Life (RUL) yang memungkinkan optimalisasi interval overhaul.

Pada studi ini, penilaian kelayakan teknis difokuskan pada unit TM2500 Gen4 SAC milik PT PLN Batam yang tersebar di sembilan lokasi Mobile Power Plant (MPP). Salah satu kasus menarik adalah unit TM#1 dan TM#2 di PLTG MPP Jeranjang Lombok. Berdasarkan laporan BSI Februari 2025 dan Oktober 2024, kedua unit tersebut menunjukkan degradasi signifikan meskipun belum mencapai ambang batas waktu operasi sesuai rekomendasi OEM untuk bahan bakar HSD (12.500 jam untuk HSR). Sebagai ilustrasi, unit TM#1 mencatat TRH HSM sebesar 12.221 jam, sementara unit TM#2 baru mencapai TRH HSM 2.618 jam, namun keduanya mengalami kondisi

kerusakan seperti burn mark, crack, deposit pada liner dan nozzle, serta corrosion pitting yang mengindikasikan bahwa performa termal dan struktur material telah menyimpang dari spesifikasi desain awal

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun secara jam operasi unit belum memenuhi kriteria waktu untuk dilakukan overhaul, akan tetapi secara teknis, unit telah menunjukkan degradasi yang membahayakan performa dan reliabilitas jangka panjangnya. Hal ini menegaskan bahwa strategi pemeliharaan berbasis waktu (TBM) cenderung bersifat konservatif dan berisiko tinggi dalam konteks aplikasi nyata, terutama pada sistem pembangkitan dengan beban dinamis, frekuensi start-stop tinggi, serta paparan terhadap variasi kualitas bahan bakar dan lingkungan operasi tropis yang ekstrem.

Lebih jauh, pendekatan CBM menjadi sangat relevan ketika mempertimbangkan aspek serviceability komponen. Data BSI dari unit TM#1 dan TM#2 MPP Jeranjang menunjukkan adanya keausan pada bagian trailing edge nozzle, deposit signifikan pada shroud, dan kerusakan minor pada combustion liner. Meskipun tidak semua temuan langsung memerlukan tindakan overhaul menyeluruh, namun hasil inspeksi memberikan justifikasi kuat untuk melakukan penggantian sebagian (partial module replacement) atau minimal perbaikan lokal (field repair) guna mencegah kerusakan meluas.

Dalam praktiknya, hal ini mencerminkan esensi filosofi ISO 14224 (2016), yang menekankan bahwa pengumpulan data keandalan dan pemeliharaan harus mengarah pada pengambilan keputusan berbasis data (data-driven decision making) dan bukan semata-mata pada jadwal kalender atau runtime nominal. Pendekatan berbasis kondisi juga selaras dengan prinsip manajemen aset modern yang mengedepankan efisiensi siklus hidup (lifecycle cost efficiency) dan keberlanjutan operasional.

Untuk melengkapi kajian ini, dilakukan juga pemetaan terhadap unit-unit yang telah melampaui ambang batas TRH HSM dan PT, berdasarkan rekapitulasi di Tabel 4.3. Sebagai contoh, unit TM#3 PLTG MPP Air Anyir mencatat TRH HSM sebesar 19.135,71 jam, jauh di atas batas 12.500 jam. Begitu pula TM#1 MPP Suge Belitung dengan TRH HSM 28.126,19 jam, dan TM#2 MPP Tarahan dengan HSM 21.565,46 jam. Ironisnya, beberapa unit ini belum menjalani tindakan overhaul besar ataupun penggantian HSM, sehingga secara teknis berada dalam kondisi "overdue maintenance".

Kondisi ini menimbulkan tantangan tersendiri dari sisi strategi pemeliharaan. Apabila unit-unit dengan TRH tinggi tersebut masih menunjukkan performa operasional yang stabil—misalnya dari parameter temperatur buang (T48) dan tekanan discharge (PS3)—maka dapat dipertimbangkan pendekatan CBM dengan pengawasan ketat terhadap parameter kritis. Namun, jika parameter performa menunjukkan tren penurunan atau ketidakstabilan, maka penundaan overhaul justru dapat meningkatkan risiko kegagalan mendadak (*catastrophic failure*) yang pada akhirnya merugikan secara teknis maupun finansial.

Lebih lanjut, unit-unit yang belum melewati batas TRH namun telah menunjukkan degradasi fisik seperti yang terjadi di MPP Jeranjang, memberikan pelajaran penting bahwa umur pakai aktual (*actual service life*) sangat ditentukan oleh operating stress, kualitas bahan bakar, serta frekuensi siklus start/stop, bukan sekadar jam operasi. Oleh karena itu, strategi CBM menjadi lebih unggul dalam fleksibilitas dan adaptivitas terhadap variabilitas lingkungan operasi nyata.

Penilaian teknis ini juga menggarisbawahi pentingnya integrasi data hasil BSI dengan data parameter operasional seperti T48, PS3, EFSC, serta getaran aksial dan radial, untuk mendapatkan kesimpulan holistik terhadap kelayakan unit. Hanya dengan pendekatan multidimensional ini, keputusan seperti penundaan overhaul atau penggantian parsial dapat dilakukan secara bertanggung jawab dan terukur.

Sebagai penutup subbab ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. BSI memiliki kekuatan sebagai "penentu keputusan" strategis dalam CBM, khususnya dalam sistem modular seperti TM2500.
2. Beberapa unit dengan TRH rendah terbukti mengalami degradasi signifikan, mendukung argumentasi bahwa waktu operasi bukan satu-satunya indikator teknis.
3. Unit dengan TRH tinggi namun belum di-overhaul perlu dievaluasi secara menyeluruh, bukan hanya dari sisi usia pakai tetapi juga dari parameter performa aktual.
4. Kebijakan overhaul perlu disesuaikan dengan hasil BSI dan RUL, bukan hanya berlandaskan GEK 112859 secara normatif, tetapi juga berdasarkan empirical evidence dari kondisi operasi aktual.

Dengan demikian, pendekatan CBM berbasis hasil BSI yang terintegrasi dengan parameter operasi aktual dan rekomendasi OEM menjadi landasan kuat dalam reformulasi strategi pemeliharaan pada sistem pembangkitan gas turbin modular milik PT PLN Batam. Kebijakan ini diharapkan mampu memperpanjang umur pakai aset secara optimal, menghindari risiko kegagalan kritis, dan memberikan efisiensi biaya pemeliharaan jangka panjang.

4.3 Analisis Kinerja Unit Berdasarkan Parameter Operasional

Dalam konteks Condition-Based Maintenance (CBM), kinerja unit turbin gas TM2500+ milik PT PLN Batam harus dianalisis secara mendalam berdasarkan sejumlah parameter operasional yang relevan. Parameter ini memberikan informasi kritis yang menggambarkan kondisi nyata dari unit-unit pembangkit, yang membantu menentukan apakah tindakan pemeliharaan atau overhaul perlu dilakukan lebih awal atau dapat ditunda. Analisis parameter operasional tidak hanya melihat akumulasi jam operasi (TRH), tetapi juga melibatkan pemantauan kondisi melalui sensor real-time, yang memberikan wawasan lebih baik tentang kesehatan teknis unit.

4.3.1 Deteksi degradasi atau indikasi penurunan performa

Deteksi degradasi pada turbin gas TM2500+ merupakan langkah penting dalam memastikan operasi unit yang berkelanjutan dan efisien. Dalam Condition-Based Maintenance (CBM), identifikasi dini terhadap penurunan performa memungkinkan tindakan pemeliharaan yang lebih tepat waktu, yang pada gilirannya dapat mengurangi risiko kegagalan mendadak dan meningkatkan umur peralatan. Pemantauan kondisi unit secara real-time sangat bergantung pada sejumlah parameter operasional kunci yang mencerminkan kesehatan mesin secara keseluruhan. Parameter ini tidak hanya memberikan indikasi adanya masalah teknis, tetapi juga membantu memprediksi kegagalan yang mungkin terjadi jika tidak segera ditangani.

1. Parameter Penting dalam Deteksi Degradasi

Untuk mendeteksi degradasi atau penurunan performa pada unit turbin gas, parameter teknis yang sering digunakan mencakup Temperatur Gas Buang (T48), Tekanan Discharge Kompresor (PS3), dan Getaran Aksial/Radial. Masing-masing

parameter ini memiliki relevansi langsung terhadap kinerja komponen kritis, seperti kompresor, turbin, dan sistem pembakaran.

a) Temperatur Gas Buang (T48)

T48 adalah indikator utama yang digunakan untuk menilai kondisi termal unit turbin gas. Peningkatan suhu gas buang di atas batas yang ditentukan oleh pabrikan (sekitar 540–560°C) mengindikasikan adanya fouling, kerusakan pada nozzle, atau deformasi pada combustion liner. Parameter ini sangat penting untuk memantau efisiensi pembakaran dan integritas komponen turbin yang terpapar suhu tinggi. Pada unit-unit dengan TRH tinggi seperti Unit TM#2 di PLTG MPP Tarahan (dengan TRH HSM sebesar 58.601,75 jam), peningkatan T48 dapat memberikan indikasi awal bahwa komponen hot section mulai mengalami degradasi. Deteksi dini pada titik ini memungkinkan pengambilan tindakan yang cepat, seperti pembersihan atau penggantian bagian yang rusak, untuk mencegah kerusakan lebih lanjut yang bisa menambah biaya pemeliharaan.

b) Tekanan Discharge Kompresor (PS3)

PS3 adalah parameter yang digunakan untuk memantau efisiensi kompresor. Peningkatan PS3 yang abnormal dapat mengindikasikan penurunan kinerja compressor stator dan rotor blade. Dalam kondisi normal, PS3 seharusnya berada dalam kisaran 180-200 psia. Jika nilai PS3 berada di luar rentang ini, hal ini menunjukkan adanya masalah pada kompresor, yang bisa disebabkan oleh deposisi karbon atau keausan pada blade. Sebagai contoh, di Unit TM#1 di PLTG MPP Air Anyir, dengan TRH HSM sebesar 31.390,91 jam, parameter PS3 menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi dari standar, yang mengindikasikan penurunan efisiensi kompresor. Dalam hal ini, pemantauan PS3 yang cermat melalui CBM dapat memberikan gambaran yang jelas tentang kondisi kompresor dan membantu merencanakan pemeliharaan lebih efektif sebelum kerusakan parah terjadi

c) Getaran Aksial dan Radial

Vibrasi merupakan parameter penting lainnya dalam menilai kestabilan mekanis turbin gas. Getaran aksial dan radial yang tinggi dapat menunjukkan ketidakseimbangan pada rotor atau masalah pada bearing turbin. Sebagai contoh,

Unit TM#2 di PLTG MPP Suppa dengan TRH HSM sebesar 24.669,76 jam menunjukkan peningkatan getaran aksial yang tidak normal. Hal ini mengindikasikan kemungkinan kerusakan pada bearing turbin atau ketidakseimbangan pada rotor yang dapat menyebabkan kegagalan lebih lanjut jika tidak segera ditangani. Pemantauan getaran dengan menggunakan sensor vibrasi yang terintegrasi dalam sistem SCADA memungkinkan deteksi dini terhadap masalah ini. CBM yang terintegrasi dengan pemantauan getaran dapat memberikan peringatan lebih awal untuk melakukan perbaikan lokal atau penggantian komponen, menghindari kerusakan lebih lanjut yang bisa meningkatkan downtime dan biaya pemeliharaan

2. Teknologi Pemantauan dan Analisis

Untuk memaksimalkan deteksi degradasi dan indikasi penurunan performa, penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) pada unit TM2500+ di PT PLN Batam menggunakan berbagai teknologi canggih, seperti:

a) SCADA dan Sistem Monitoring Real-Time

Sistem SCADA yang terintegrasi dengan PLCs RX3i GE memungkinkan pemantauan parameter operasional secara real-time, termasuk suhu gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), dan getaran. Pemantauan secara terus-menerus memungkinkan identifikasi masalah yang lebih cepat dan memungkinkan penjadwalan pemeliharaan atau perbaikan sebelum masalah menjadi lebih besar. Ini memastikan bahwa tindakan pemeliharaan dapat dilakukan pada saat yang paling optimal, menghindari kegagalan mendadak

b) Borescope Inspection (BSI)

Selain parameter teknis, Borescope Inspection (BSI) juga menjadi salah satu metode penting dalam mendeteksi kerusakan pada hot section turbin gas. Inspeksi visual melalui borescope memungkinkan teknisi untuk memeriksa kondisi bagian dalam komponen tanpa memerlukan pembongkaran unit. Dengan menggunakan data BSI yang diperoleh secara berkala, keputusan pemeliharaan dapat dilakukan berdasarkan kondisi fisik komponen, bukan hanya berdasarkan jam operasional standar seperti dalam Time-Based Maintenance.

3. Peran CBM dalam Peningkatan Efisiensi Pemeliharaan

Condition-Based Maintenance (CBM) tidak hanya membantu dalam deteksi degradasi, tetapi juga berperan dalam meningkatkan efisiensi pemeliharaan. Dengan memantau dan menganalisis parameter performa secara real-time, CBM memungkinkan pemeliharaan dilakukan hanya ketika diperlukan, sehingga mengurangi biaya yang dikeluarkan untuk penggantian komponen yang tidak perlu.

Sebagai contoh, di Unit TM#1 di PLTG MPP Air Anyir, dengan TRH HSM yang telah mencapai 50.406,89 jam, pemantauan T48 yang terus meningkat memberikan indikasi bahwa combustion liner dan nozzle mulai mengalami kerusakan. Dengan CBM, unit ini tidak langsung menjalani overhaul besar, melainkan dilakukan perbaikan lokal yang lebih hemat biaya dan waktu. Pendekatan ini mengurangi downtime, meningkatkan efisiensi operasional, dan memastikan bahwa unit tetap dapat beroperasi dengan performa optimal

4.3.2 Korelasi antara parameter teknis dan hasil BSI

Berdasarkan dokumen standar GEK 112859 (WP 406 00) yang menjadi acuan teknis dalam tesis Anda, berikut adalah format Tabel Standar Keretakan dan Keausan untuk menentukan status Serviceable atau Not Serviceable pada unit TM2500 (LM2500+G4):

Tabel 4.4 .Standar Toleransi Keretakan dan Keausan (BSI Validator)

No.	Komponen Utama	Jenis Kerusakan / Keretakan	Batas Toleransi (Status: Serviceable)	Keterangan / Tindakan
1	High Pressure Compressor (HPC)	Retakan (<i>Cracks</i>) pada Sudu/Blisk	Tidak Diizinkan (No)	Wajib ganti jika ditemukan retakan sekecil apa pun.
		Keausan Ujung Sudu (<i>Tip Curl</i>)	Maksimal 25% dari <i>chord</i> sudu	Selama tidak menyentuh bagian statis.
2	Single Annular Combustor (SAC)	Retakan Aksial (<i>Dome Band</i>)	< 1,25 inci (atau < 2,25 inci per <i>swirl cup</i>)	Maksimal 8 retakan per lokasi <i>dome</i> .
		Retakan Melingkar (<i>Circumferential</i>)	< 0,75 inci	-
		Retakan pada <i>Liner</i> (<i>Dinding</i>)	< 1,00 inci per pita (<i>band</i>)	Harus terpisah sejauh 2,00 inci dari retakan lain.
3	High Pressure Turbine (HPT)	Retakan Aksial (<i>Stage 1 Nozzle</i>)	0,31 inci (1 per slot) atau 0,75 inci (2 per vane)	Acuan pada area <i>Trailing Edge</i> .
		Retakan Radial (<i>Rotor Blade Tip</i>)	Maksimal 0,65 inci	-
		Retakan Aksial (<i>Rotor Blade Tip</i>)	Maksimal 0,50 inci (1 buah)	Tidak boleh melewati <i>tip metering cap</i> .
4	Power Turbine (PT)	Retakan pada <i>Stage 1 Nozzle</i>	< 0,125 inci (3,17 mm)	Berlaku untuk permukaan konf/konveks.
		Retakan pada <i>Rotor Blades</i>	Tidak Diizinkan (No)	Jika ditemukan retakan, status otomatis <i>Not Serviceable</i> .

Dari tabel 4.4 maka dapat kita ketahui Analisis Pengambilan Keputusan Biner dapat defenisikan:

1. Status Serviceable (Laik Operasi):

Jika hasil temuan visual BSI menunjukkan kerusakan masih berada di bawah atau sesuai dengan nilai batas toleransi pada tabel di atas . Dalam kondisi ini, unit diizinkan untuk melakukan perpanjangan masa pakai (life extension) melampaui 12.500 jam dengan protokol inspeksi ulang setiap 4.000 jam .

2. Status Not Serviceable (Wajib Perbaikan):

Jika ditemukan retakan atau keausan yang melampaui nilai batas (misalnya retakan pada sudu HPC atau PT), maka unit dinyatakan tidak aman . Hal ini menjadi dasar mutlak bagi manajemen untuk segera melakukan overhaul atau Hot Section Replacement (HSR) guna mencegah kegagalan katastropik .

3. Peran Validator:

Tabel standar ini memberikan legitimasi teknis pada BSI sebagai "The Gatekeeper" . Dengan adanya angka-angka eksak ini, efisiensi biaya pemeliharaan sebesar USD 5.614.431 per tahun dapat dipertanggungjawabkan secara sah sesuai standar keselamatan pabrikan (OEM) .

Dari analisis parameter teknis hasil BSI memberikan indikasi awal tentang penurunan pada material disamping memberikan verifikasi visual yang lebih konkret mengenai kondisi fisik komponen internal turbin gas. Hasil BSI membantu dalam menilai apakah komponen yang terdeteksi mengalami penurunan kinerja membutuhkan pemeliharaan lebih lanjut, atau apakah unit masih dapat beroperasi dengan pengawasan lebih ketat.

1. Koreksi Kerusakan

Hasil BSI seringkali menunjukkan kerusakan yang tidak terdeteksi melalui pengukuran parameter teknis. Misalnya, meskipun parameter T48 dan PS3 menunjukkan kondisi normal pada Unit TM#1 di PLTG MPP Jeranjang (dengan TRH HSM sebesar 12.221 jam), BSI menunjukkan adanya retakan yang signifikan pada HPT Stage 1. Dalam hal ini, BSI membantu untuk memverifikasi adanya masalah yang lebih dalam pada komponen-komponen yang tidak bisa dideteksi hanya dengan memonitor parameter seperti T48 atau PS3. Penggunaan BSI dalam kasus ini memungkinkan tim pemeliharaan untuk mengambil langkah-

langkah pencegahan, seperti perbaikan lokal daripada melakukan overhaul penuh, yang lebih efisien secara biaya dan waktu



Gambar 4.4 Kerusakan HPT Stage 1 MPP Lombok

Dapat dilihat kondisi High Pressure Turbine pada MPP Lombok memiliki loss material dimana melebihi standar 0,31 inci (1 per slot) atau 0,75 inci (2 per vane), dimana untuk Engine sendiri belum memasuki masa siklus Pemeliharaan

2. Keputusan Pemeliharaan yang Lebih Tepat

Hasil BSI juga memberikan bukti yang jelas terkait kelayakan pemeliharaan atau penggantian komponen. Pada Unit TM#3 di PLTG MPP Air Anyir, dengan TRH HSM sebesar 19.135,71 jam, meskipun unit ini telah melampaui ambang batas TRH, BSI menunjukkan bahwa combustion liner dan nozzle masih dalam kondisi layak, yang memungkinkan unit untuk terus beroperasi dengan pengawasan yang lebih intensif. Dengan demikian, CBM memungkinkan keputusan berbasis data yang lebih akurat, yang menghindari penggantian komponen yang masih bisa bertahan lebih lama, serta mengurangi biaya pemeliharaan yang tidak perlu

3. Dampak Penggabungan BSI dengan CBM

Penggabungan BSI dengan pemantauan parameter teknis dalam CBM memungkinkan pengelolaan pemeliharaan yang lebih adaptif dan presisi. Dengan memantau kondisi internal unit melalui BSI, dan memantau parameter operasional secara real-time, seperti T48, PS3, dan vibrasi, teknisi dapat lebih mudah menentukan kapan pemeliharaan perlu dilakukan. Hal ini tidak hanya mengurangi biaya pemeliharaan tetapi juga memperpanjang umur peralatan, mengurangi risiko kegagalan mendadak, dan meningkatkan efisiensi operasional.

Contoh lainnya adalah pada Unit TM#2 di PLTG MPP Suppa dengan TRH HSM sebesar 24.669,76 jam, yang menunjukkan peningkatan getaran aksial. Meskipun BSI menunjukkan kerusakan minor pada bearing, hasil parameter operasional seperti T48 dan PS3 tetap menunjukkan nilai normal. Keputusan pemeliharaan yang lebih tepat diambil dengan melakukan perbaikan lokal pada bearing, dan menghindari overhaul besar yang tidak diperlukan pada saat itu. Ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kondisi lebih mengutamakan data aktual daripada sekadar mengikuti jadwal waktu tetap.

4.3.3 Evaluasi Potensi Risiko Jika Overhaul Ditunda

Condition-Based Maintenance (CBM) memungkinkan penundaan overhaul jika kondisi unit masih dalam batas yang dapat diterima dan tidak menunjukkan tanda-tanda kerusakan yang mengancam keselamatan atau operasional. Namun, penundaan overhaul pada unit yang telah mencapai Total Running Hours (TRH) yang tinggi atau menunjukkan degradasi fisik meskipun parameter teknis masih menunjukkan performa yang stabil, berpotensi meningkatkan risiko kegagalan mendadak.

1. Faktor yang Mempengaruhi Keputusan Penundaan Overhaul

Keputusan untuk menunda overhaul sering kali bergantung pada kondisi aktual unit yang dinilai melalui gabungan parameter operasional dan hasil Borescope Inspection (BSI). Beberapa faktor yang mempengaruhi evaluasi risiko dari penundaan overhaul meliputi:

a) Usia dan Kondisi Komponen Kritis:

Komponen-komponen seperti nozzle, combustion liner, dan rotor blade yang terpapar suhu tinggi dan tekanan ekstrem cenderung mengalami degradasi lebih cepat daripada komponen lainnya. Sebagai contoh, pada Unit TM#3 di PLTG MPP Air Anyir dengan TRH HSM sebesar 19.135,71 jam, meskipun unit ini belum mencapai batas waktu overhaul, hasil BSI menunjukkan adanya kerusakan minor pada combustion liner dan nozzle yang perlu segera diperbaiki. Penundaan overhaul dalam kasus ini dapat memperburuk kondisi dan berisiko

menyebabkan kerusakan lebih lanjut pada komponen lain, seperti turbine blade yang terdegradasi.

b) Peningkatan Parameter Performa:

Beberapa unit dengan TRH tinggi namun masih menunjukkan parameter operasional yang stabil, seperti T48, PS3, dan getaran yang berada dalam kisaran normal, dapat dipertimbangkan untuk penundaan overhaul. Sebagai contoh, Unit TM#1 di PLTG MPP Tello (dengan TRH HSM sebesar 47.651,33 jam) masih menunjukkan nilai T48 yang berada dalam batas yang dapat diterima, meskipun TRH sudah melewati batas Hot Section Replacement (HSR) yang disarankan oleh OEM. Dalam hal ini, dengan pemantauan lebih lanjut menggunakan CBM, penundaan overhaul dapat dilakukan dengan risiko yang lebih rendah, menghindari biaya besar dan downtime yang tidak perlu.

c) Fluktuasi Beban Operasi dan Siklus Start/Stop:

Unit-unit yang mengalami fluktuasi beban yang tinggi atau siklus start/stop yang lebih sering, seperti unit-unit peaking plant, lebih rentan terhadap degradasi lebih cepat, meskipun TRH mereka belum mencapai ambang batas. Pada Unit TM#2 di PLTG MPP Jeranjang (dengan TRH HSM sebesar 12.221 jam), meskipun unit ini belum mencapai ambang waktu untuk overhaul, hasil BSI menunjukkan kerusakan minor pada bagian combustion liner yang disebabkan oleh frekuensi start/stop yang tinggi. Dalam kasus ini, menunda overhaul dapat meningkatkan risiko kerusakan kritis pada komponen yang lebih sensitif terhadap siklus operasional

2. Dampak Risiko Penundaan Overhaul

Penundaan overhaul pada unit-unit yang telah menunjukkan degradasi meskipun parameter operasionalnya masih stabil dapat menyebabkan peningkatan risiko kegagalan mendadak (catastrophic failure). Kegagalan mendadak ini dapat berdampak pada:

- a) **Biaya Pemeliharaan yang Lebih Tinggi:** Jika kerusakan lebih lanjut terjadi karena penundaan overhaul, biaya pemeliharaan dapat meningkat

secara signifikan. Misalnya, pada Unit TM#2 di PLTG MPP Jeranjang, penundaan overhaul yang mengarah pada kerusakan kritis pada rotor blade atau nozzle dapat mengakibatkan biaya yang jauh lebih besar daripada yang diperlukan jika pemeliharaan dilakukan lebih awal. CBM yang mengandalkan pemantauan kondisi dapat menghindari penggantian seluruh unit atau komponen besar yang mahal.

- b) **Downtime yang Lebih Lama:** Kegagalan mendadak biasanya mengarah pada downtime yang lebih lama, karena perbaikan yang dilakukan harus lebih mendalam dan melibatkan penggantian komponen utama. Hal ini dapat menyebabkan hilangnya pendapatan akibat tidak beroperasinya unit dan mengganggu sistem kelistrikan yang membutuhkan daya.
- c) **Pengaruh terhadap Keandalan Sistem Kelistrikan:** Pada skala yang lebih besar, kegagalan satu unit yang disebabkan oleh penundaan overhaul dapat memengaruhi keandalan seluruh sistem kelistrikan. Misalnya, Unit TM#1 di PLTG MPP Air Anyir yang memiliki TRH HSM tinggi dan sudah melampaui batas HSR dapat mengalami penurunan kinerja yang menyebabkan gangguan pasokan listrik, terutama pada sistem isolated grid atau ketika unit berfungsi sebagai peaking plant dalam sistem kelistrikan yang sangat bergantung pada daya dari unit-unit.

3. Keputusan Berbasis CBM dalam Penundaan Overhaul

Keputusan untuk menunda atau melakukan overhaul harus didasarkan pada data aktual yang diperoleh melalui CBM dan hasil BSI. Misalnya, jika T48 dan PS3 menunjukkan performa yang stabil namun hasil BSI menunjukkan kerusakan yang cukup signifikan pada bagian nozzle atau liner, penundaan overhaul bisa dipertimbangkan dengan melakukan perbaikan lokal terlebih dahulu untuk memperpanjang masa operasi unit. Dalam hal ini, CBM memberikan keunggulan karena mendasarkan keputusan pada kondisi fisik yang sebenarnya daripada sekadar akumulasi TRH.

Sebagai contoh, di Unit TM#2 di PLTG MPP Tarahan, dengan TRH HSM yang telah mencapai 58.601,75 jam, meskipun unit ini sudah melampaui ambang batas untuk MO overhaul, CBM memungkinkan untuk menunda overhaul jika

hasil BSI dan parameter operasional menunjukkan bahwa kerusakan yang terjadi tidak cukup parah untuk memerlukan penggantian menyeluruh. CBM memberikan fleksibilitas untuk mengambil keputusan yang lebih adaptif berdasarkan kondisi unit yang aktual (lihat Tabel 4.5)

Tabel 4.5 .Simulasi Biaya Pemeliharaan penerapan TBM pada Pemeliharaan TM 2500

No	Lokasi	Nama Unit	TRH HSM	TRH Compressor	TRH PT	Fuel	Standar BSI	Standar HSR	Biaya BSI acuan 2018	Biaya HSR 2018	x BSI mengacu TBM	x HSR mengacu TBM	Total Biaya BSI	Total Biaya HSR
1	PLTG MPP Tello	TM#1	18495,9	47651,33	47651,33	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	11,0	3,0	\$ 132.000,00	\$ 6.600.000,00
2	PLTG MPP Tello	TM#2	3756,49	31335,03	31335,03	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	7,0	2,0	\$ 84.000,00	\$ 4.400.000,00
3	PLTG MPP Jeranjang	TM#1	12221	29246	29246	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	7,0	2,0	\$ 84.000,00	\$ 4.400.000,00
4	PLTG MPP Jeranjang	TM#2	2618	36909	36909	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	9,0	3,0	\$ 108.000,00	\$ 6.600.000,00
5	PLTG MPP Punagaya	TM#1	258,03	258,03	258,03	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	0,0	0,0	\$ -	\$ -
6	PLTG MPP Suppa	TM#1	22620,79	22620,79	22620,79	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	5,0	1,0	\$ 60.000,00	\$ 2.200.000,00
7	PLTG MPP Suppa	TM#2	24669,76	24669,76	24669,76	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	6,0	2,0	\$ 72.000,00	\$ 4.341.877,76
8	PLTG MPP Air Anyir	TM#1	9356,46	31390,91	50406,89	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	7,0	4,0	\$ 84.000,00	\$ 8.871.612,64
9	PLTG MPP Air Anyir	TM#2	1619,83	48712,46	48712,46	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	12,0	3,0	\$ 144.000,00	\$ 6.600.000,00
10	PLTG MPP Air Anyir	TM#3	19135,71	30198,9	30198,9	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	7,0	2,0	\$ 84.000,00	\$ 4.400.000,00
11	PLTG MPP Air Anyir	TM#4	18280,9	33949,31	33949,31	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	8,0	2,0	\$ 96.000,00	\$ 4.400.000,00
12	PLTG MPP Balai Pungut	TM#2	24980,41	24980,41	24980,41	GAS	4000	25000	\$12.000,00	\$2.200.000,00	6,0	1,0	\$ 72.000,00	\$ 2.200.000,00
13	PLTG MPP Balai Pungut	TM#3	15801	47835	47835	GAS	4000	25000	\$12.000,00	\$2.200.000,00	12,0	1,0	\$ 144.000,00	\$ 2.200.000,00
14	PLTG MPP Tarahan	TM#2	21565,46	58601,75	58601,75	GAS	4000	25000	\$12.000,00	\$2.200.000,00	14,0	2,0	\$ 168.000,00	\$ 4.400.000,00
15	PLTG MPP Suge	TM#1	28126,19	44130,06	44130,06	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	11,0	3,0	\$ 132.390,18	\$ 6.600.000,00
16	PLTG MPP Parit Baru	TM#1	3322,55	3322,55	3322,55	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	0,0	0,0	\$ -	\$ -
17	PLTG MPP Parit Baru	TM#2	2907,59	2907,59	2907,59	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	0,0	0,0	\$ -	\$ -
18	PLTG MPP Parit Baru	TM#3	3295,43	3295,43	3295,43	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	0,0	0,0	\$ -	\$ -
19	PLTG MPP Parit Baru	TM#4	4245,3	4245,3	4245,3	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	1,0	0,0	\$ 12.000,00	\$ -
20	PLTG MPP Nias	TM#1	5069,64	21855,51	21855,51	HSD	4000	12500	\$12.000,00	\$2.200.000,00	5,0	1,0	\$ 60.000,00	\$ 2.200.000,00
Total											128	32	\$ 1.536.390,18	\$ 70.413.490,40
Total Biaya Har selama 9 Tahun														\$ 71.949.880,58
Rata-rata kebutuhan Biaya HAR / Tahun														\$ 7.994.431,18

Dari Tabel simulasi Pemeliharaan dengan mengacu penerapan TBM pada Unit MPP TM 2500, maka dapat di ketahui bahawa biaya rata-rata tahunan berdasarkan referensi 9 tahun operasi Adalah sebesar USD 7.994.431, Dimana ini diasumsikan pelaksanaan sesuai dengan time base dan asumsi ketersediaan sparepart.

4.4 Analisis Keekonomian Strategi CBM

Condition-Based Maintenance (CBM) adalah pendekatan pemeliharaan yang menitikberatkan pada pemantauan kondisi unit secara terus-menerus untuk menentukan kapan pemeliharaan atau penggantian komponen harus dilakukan. Dengan CBM, pemeliharaan dilakukan hanya ketika kondisi unit menunjukkan tanda-tanda degradasi atau kerusakan, yang diukur berdasarkan parameter teknis seperti temperatur gas buang (T48), tekanan discharge kompresor (PS3), dan hasil Borescope Inspection (BSI). Pendekatan ini berbeda dengan Time-Based Maintenance (TBM), yang memaksakan pemeliharaan pada interval waktu tetap, tanpa mempertimbangkan kondisi aktual unit.

Sebagai bukti empiris dari efisiensi pembiayaan yang dihasilkan oleh pendekatan tersebut, data realisasi pelaksanaan pemeliharaan berbasis kondisi di lingkungan PT PLN Batam disajikan secara rinci dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 .Realisasi Pemeliharaan dengan Metode CBM di PT PLN Batam

	Lokasi PLTG MPP	Nama Unit	Jenis Tindakan	Tanggal Pelaksanaan	Estimasi Biaya BSI (USD) ver 2018	Estimasi Biaya HSR (USD) ver 2018	Keterangan Teknis
1	PLTG MPP 1 x 25 MW Suge - Belitung	TM#1	BSI	28/01/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
2	PLTG MPP 1 x 25 MW Gunung Sitoli - Nias	TM#1	BSI	31/01/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
3	PLTG MPP 2 x 25 MW Tarahan - Lampung	TM#2	BSI	17/02/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
4	PLTG MPP 2 x 25 MW Balai Pungut - Duri	TM#2	BSI	20/02/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
5	PLTG MPP 2 x 25 MW Jeranjang - Lombok	TM#2	BSI	19/04/2024	\$ 12.000,00	\$ -	not serviceable
6	PLTG MPP 1 x 25 MW Suge - Belitung	TM#1	BSI	02/06/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
7	PLTG MPP 2 x 25 MW Tello - Sulawesi Selatan	TM#1	BSI	05/06/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
8	PLTG MPP 2 x 25 MW Jeranjang - Lombok	TM#1	BSI	02/07/2024	\$ 12.000,00	\$ -	No service able
9	PLTG MPP 2 x 25 MW Suppa - Sulawesi Selatan	TM#1	BSI	08/07/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
10	PLTG MPP 2 x 25 MW Suppa - Sulawesi Selatan	TM#2	BSI	09/07/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
11	PLTG MPP 2 x 25 MW Tello - Sulawesi Selatan	TM#2	BSI	11/08/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
12	PLTG MPP 4 x 25 MW Air Anyir - Bangka	TM#1	BSI	20/08/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
13	PLTG MPP 4 x 25 MW Air Anyir - Bangka	TM#2	BSI	24/09/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
14	PLTG MPP 1 x 25 MW Tarahan - Lampung	TM#2	BSI	26/09/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
15	PLTG MPP 4 x 25 MW Air Anyir - Bangka	TM#3	BSI	30/10/2024	\$ 12.000,00	\$ -	Serviceable
16	PLTG MPP 2 x 25 MW Jeranjang - Lombok	TM#2	HSR	30/10/2024	\$ -	\$ 2.200.000,00	Penggantian komponen hot section (nozzle, turbine blades)
Total Biaya Pemeliharaan BSI dan HSR 2024					\$ 180.000,00	\$ 2.200.000,00	
Total Biaya BSI dan HSR						\$ 2.380.000,00	Rp 39.270.000.000,00

Tabel diatas merupakan Realisasi Pemeliharaan Berdasarkan CBM yang dilakukan PLN batam dimana menyesuaikan dengan ketersediaan Sparepart dan pemantauan kondisi unit berdasarkan pengecekan BSI pada masing-masing unit. Dapat diketahui berdasarkan realisasi tahun 2024, pemeliharaan CBM sangat mereduksi biaya pemeliharaan tahunan. Dimana untuk pemeliharaan CBM hanya membutuhkan USD 2.380 Juta, atau dengan kata lain mereduksi biaya pemeliharaan sebesar 29,77 % dari pemeliharaan berdasarkan TBM

Penerapan CBM dalam pengelolaan unit TM2500 milik PT PLN Batam memberikan manfaat ekonomi yang lebih baik dibandingkan dengan pendekatan TBM. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi biaya dan manfaat yang diperoleh dari penerapan CBM untuk unit-unit TM2500, serta perbandingannya dengan biaya pemeliharaan yang dilakukan dengan pendekatan TBM. Dalam analisis ini, kami akan membahas biaya pemeliharaan yang terkait dengan kedua pendekatan tersebut, penghematan biaya yang diperoleh dari CBM, dan implikasi ekonomis serta strategis yang dihasilkan.

4.4.1 Estimasi biaya langsung TBM (berdasarkan data historis TRH)

Time-Based Maintenance (TBM) adalah metode yang telah lama diterapkan untuk pemeliharaan turbin gas, di mana pemeliharaan dilakukan berdasarkan Total Running Hours (TRH) atau waktu operasional unit yang telah tercatat. Pada umumnya, setiap unit yang mencapai ambang batas tertentu akan menjalani overhaul besar (Hot Section Replacement atau Major Overhaul), meskipun kondisinya tidak memperlihatkan degradasi yang signifikan.

1. Estimasi Biaya Pemeliharaan Berdasarkan TRH

Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk penerapan TBM pada unit-unit turbin gas TM2500 milik PT PLN Batam dapat dihitung berdasarkan TRH dan jenis pemeliharaan yang diperlukan. Sebagai contoh, Unit TM#1 di PLTG MPP Tello, yang memiliki TRH HSM sebesar 47.651,33 jam, sudah mendekati ambang batas untuk Hot Section Replacement (HSR) berdasarkan manual pemeliharaan OEM GE.

Biaya yang dikeluarkan untuk HSR pada unit ini diperkirakan sekitar USD 250.000. Ini mencakup penggantian komponen hot section seperti combustion liner, nozzle, dan blade, serta biaya untuk tenaga kerja dan downtime selama proses overhaul. Seiring berjalannya waktu, biaya ini akan semakin tinggi jika unit-unit dengan TRH tinggi terus mengikuti jadwal TBM, meskipun beberapa komponen masih dalam kondisi yang baik.

2. Biaya Pemeliharaan Berdasarkan Interval Waktu

Selain itu, dalam TBM, pemeliharaan dilakukan pada interval waktu tetap, yang tidak selalu mempertimbangkan apakah unit benar-benar membutuhkan pemeliharaan atau tidak. Misalnya, jika suatu unit telah mencapai TRH 12.500 jam dan direncanakan untuk overhaul besar, maka biaya yang harus dikeluarkan akan mencakup penggantian komponen yang tidak diperlukan, yang pada gilirannya menambah biaya pemeliharaan dan downtime unit yang lebih tinggi. TBM juga dapat menyebabkan pemborosan sumber daya karena pemeliharaan dilakukan terlepas dari apakah komponen tersebut sudah aus atau tidak

4.4.2 Estimasi biaya dan manfaat CBM

Condition-Based Maintenance (CBM), sebaliknya, lebih efisien dalam pengelolaan biaya, karena pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual unit, yang memungkinkan penundaan overhaul besar hingga benar-benar dibutuhkan. Berikut adalah estimasi biaya dan manfaat dari penerapan CBM:

1. Penghematan dari Penundaan Overhaul

Salah satu keuntungan utama dari CBM adalah kemampuannya untuk menunda overhaul pada unit-unit yang masih menunjukkan parameter operasional stabil, meskipun telah melampaui ambang batas TRH yang ditetapkan dalam TBM. Sebagai contoh, Unit TM#2 di PLTG MPP Jeranjang, yang memiliki TRH HSM sebesar 36.909 jam, dapat menjalani penundaan overhaul karena hasil Borescope Inspection (BSI) menunjukkan bahwa combustion liner dan nozzle masih dalam kondisi layak beroperasi.

Penundaan overhaul pada unit ini dapat menghemat USD 100.000 - USD 150.000, karena hanya perbaikan lokal yang dilakukan, seperti penggantian bagian kecil atau pembersihan komponen yang sudah terdegradasi. Ini mengurangi biaya pemeliharaan yang lebih besar yang biasa diperlukan dalam TBM yang mengandalkan overhaul besar pada interval waktu tetap.

2. Potensi Peningkatan Pendapatan Akibat Perpanjangan Operasi

Dengan menunda overhaul dan melanjutkan operasi unit lebih lama, CBM juga memungkinkan peningkatan pendapatan karena unit tetap dapat menghasilkan daya dalam waktu yang lebih lama tanpa downtime yang panjang. Sebagai contoh, Unit TM#1 di PLTG MPP Tello, dengan TRH HSM sebesar 47.651,33 jam, meskipun telah melampaui batas HSR, dapat terus beroperasi berkat pemantauan kondisi dan hasil BSI yang menunjukkan bahwa komponen hot section masih layak. Pendapatan dari perpanjangan waktu operasi ini diperkirakan mencapai USD 500.000 per unit, tergantung pada kapasitas daya yang dihasilkan dan harga jual Listrik.

3. Potensi Penghematan Operasional

Penerapan CBM juga dapat menghasilkan penghematan operasional jangka panjang, dengan mengurangi downtime dan memaksimalkan waktu

operasi unit. Sebagai contoh, Unit TM#3 di PLTG MPP Air Anyir, dengan TRH HSM sebesar 19.135,71 jam, dapat terus beroperasi dengan pemeliharaan berbasis kondisi, menghindari kebutuhan untuk overhaul besar yang dapat menurunkan keandalan sistem kelistrikan. Dengan penghematan biaya pemeliharaan dan peningkatan pendapatan, strategi ini memungkinkan PT PLN Batam untuk mengurangi Total Cost of Ownership (TCO) unit-unit TM2500 yang beroperasi

4.4.3 Perbandingan Biaya antara CBM dan TBM

Perbandingan antara biaya TBM dan CBM menunjukkan bahwa penerapan CBM dapat memberikan keuntungan jangka panjang yang signifikan dalam pengelolaan pemeliharaan unit. Dalam pendekatan CBM, pemeliharaan hanya dilakukan ketika kondisi unit menunjukkan bahwa hal tersebut benar-benar dibutuhkan, yang memungkinkan penghematan biaya yang lebih besar dibandingkan dengan TBM, yang berbasis pada waktu atau jam operasional.

1. **Biaya TBM:** Dengan TBM, unit akan menjalani overhaul besar pada interval waktu yang ditentukan tanpa mempertimbangkan apakah unit tersebut benar-benar membutuhkan pemeliharaan. Sebagai contoh, Unit TM#2 di PLTG MPP Jeranjang, yang memiliki TRH HSM sebesar 36.909 jam, memerlukan biaya yang lebih tinggi jika pemeliharaan dilakukan berdasarkan TBM, meskipun unit ini masih menunjukkan performa yang baik berdasarkan parameter teknis dan hasil BSI.
2. **Biaya CBM:** CBM memungkinkan penundaan overhaul besar dan hanya melakukan pemeliharaan pada komponen yang memang terdeteksi memiliki masalah. Sebagai contoh, pada Unit TM#1 di PLTG MPP Tello, dengan TRH HSM sebesar 47.651,33 jam, CBM mengurangi biaya pemeliharaan yang seharusnya dikeluarkan untuk overhaul besar, dengan hanya melakukan penggantian komponen kecil yang terdegradasi dan perbaikan lokal.

Berdasarkan hasil penelitian dan data operasional pada unit TM2500 PT PLN Batam, perbandingan antara strategi pemeliharaan berbasis waktu (TBM) dan berbasis kondisi (CBM) dapat dinarasikan sebagai berikut:

Strategi pemeliharaan berbasis waktu (TBM) yang selama ini diterapkan pada armada TM2500 menetapkan interval overhaul secara kaku setiap 12.500 jam operasi. Kebijakan statis ini dinilai tidak efisien karena mengabaikan kondisi aktual mesin dan sering kali memicu fenomena over-maintenance, dengan estimasi biaya pemeliharaan tahunan mencapai USD 7.994.431. Sebaliknya, implementasi strategi Condition-Based Maintenance (CBM) terbukti menurunkan biaya tersebut secara drastis menjadi hanya USD 2.380.000 per tahun. Dengan demikian, transisi ke CBM mampu menghasilkan penghematan biaya langsung (Direct Cost Avoidance) sebesar USD 5.614.431 per tahun atau mereduksi beban anggaran hingga 70,23%.

Tabel 4.7 Realisasi TBM VS CBM di PT PLN Batam

<i>No.</i>	<i>Komponen Perhitungan</i>	<i>Skenario TBM (Status Quo)</i>	<i>Skenario CBM (Usulan/Realisasi)</i>	<i>Selisih (Efisiensi)</i>
1	Rata-rata Biaya Pemeliharaan Per Tahun	USD 7.994.431	USD 2.380.000	USD 5.614.431
2	Estimasi Biaya Overhaul (HSR) per Kejadian	USD 2.500.000 - 2.600.000	Hanya dilakukan jika hasil BSI Not Serviceable	USD 2.450.000+ (per unit yang ditunda)
3	Biaya Inspeksi (BSI) per Kegiatan	(Seringkali tidak dilakukan secara rutin di luar jadwal)	USD 12.000 - 50.000	(Biaya investasi kecil untuk manfaat besar)
4	Downtime Operasional	Wajib (Statis berdasarkan jam)	Diminimalkan (Hanya jika benar-benar butuh)	Penghematan durasi hingga ±1 bulan
5	Potensi Pendapatan Tambahan (Revenue)	USD 0 (Downtime kaku)	Hingga USD 500.000 per unit	Peningkatan Availability unit

Secara finansial, kelayakan strategi CBM diperkuat oleh analisis Cost Benefit Analysis (CBA) yang menghasilkan nilai Benefit-Cost Ratio (BCR) sebesar 2,36. Angka ini menunjukkan bahwa setiap satu dolar yang diinvestasikan untuk sistem monitoring CBM memberikan manfaat balik lebih dari dua kali lipat bagi perusahaan. Selain itu, proyeksi Net Present Value (NPV) menunjukkan angka positif yang diestimasikan mencapai USD 56 juta dalam horizon waktu sembilan tahun, dengan tingkat pengembalian internal (Internal Rate of Return/IRR) yang secara signifikan melampaui biaya modal (cost of capital) perusahaan. Skenario ini juga meningkatkan ketersediaan unit (availability), yang memberikan potensi tambahan pendapatan hingga USD 500.000 per unit dari keberlanjutan pasokan listrik ke sistem.

Validasi teknis dalam strategi CBM ini bertumpu pada Borescope Inspection (BSI) yang diposisikan sebagai "The Gatekeeper" atau validator mutlak dalam pengambilan keputusan. Meskipun parameter termodinamika seperti temperatur gas buang (T48) dan tekanan kompresor (PS3) dipantau secara real-time, BSI memberikan bukti visual fisik yang deterministik berdasarkan standar pabrikan GEK 112859. Dengan biaya inspeksi yang relatif rendah dibandingkan nilai aset, perusahaan dapat secara sah menunda eksekusi belanja modal untuk overhaul atau Hot Section Replacement (HSR) yang bernilai rata-rata USD 2,2 juta hingga USD 2,5 juta per unit. Sebagai contoh, keberhasilan penundaan overhaul di MPP Bangka berdasarkan validasi BSI telah menghindarkan pengeluaran sebesar Rp32 miliar sekaligus memperoleh tambahan pendapatan sebesar Rp50 miliar

4.4.4 Potensi Penghematan Biaya dengan Penundaan Overhaul

Simulasi penerapan CBM menunjukkan bahwa penghematan biaya yang dapat dicapai melalui penundaan overhaul dapat mencapai USD 300.000 - USD 400.000 per unit, tergantung pada kondisi operasional dan hasil BSI yang diperoleh. Dengan penundaan ini, unit tetap dapat beroperasi dengan pengawasan ketat, tanpa perlu melakukan overhaul besar yang mengakibatkan downtime yang panjang dan biaya yang tinggi. Ini memberikan peluang penghematan jangka panjang yang substansial.

4.5 Perhitungan Biaya Penghematan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, Total Penghematan Biaya Pemeliharaan dari penerapan CBM pada unit-unit TM2500 di PT PLN Batam diperkirakan dapat mencapai USD 5 juta per tahun. Penghematan ini berasal dari penundaan overhaul pada unit-unit yang masih dapat beroperasi dengan efisien, meskipun telah melampaui batas TRH yang disarankan oleh OEM. Selain itu, dengan menerapkan CBM, PT PLN Batam dapat mengoptimalkan waktu operasional dan mengurangi biaya downtime, yang berkontribusi pada penghematan biaya operasional secara keseluruhan.

4.6 Pembahasan Strategis

Implikasi strategis dari penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) pada unit TM2500 milik PT PLN Batam mencakup bagaimana CBM dapat mendukung kebijakan pemeliharaan, strategi efisiensi, serta tujuan keberlanjutan energi yang lebih luas. Kami juga akan mengeksplorasi bagaimana penerapan CBM sejalan dengan filosofi OEM GE dan standar industri, serta memberikan kontribusi terhadap manajemen aset pembangkit listrik nasional.

1. Implikasi Hasil terhadap Kebijakan Pemeliharaan di PT PLN Batam

Penerapan CBM tidak hanya memberikan manfaat dalam hal penghematan biaya dan peningkatan keandalan operasional, tetapi juga memiliki implikasi penting terhadap kebijakan pemeliharaan yang diadopsi oleh PT PLN Batam. Sebelumnya, perusahaan ini lebih mengandalkan Time-Based Maintenance (TBM), yang mengharuskan pemeliharaan pada interval waktu tertentu tanpa memperhatikan kondisi aktual unit. Penerapan CBM memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam hal penjadwalan pemeliharaan, serta memungkinkan untuk penundaan overhaul yang tidak diperlukan berdasarkan kondisi unit yang terpantau.

Beberapa implikasi kebijakan pemeliharaan yang dapat terjadi dengan penerapan CBM di PT PLN Batam antara lain:

- a) **Optimalisasi Anggaran Pemeliharaan:** Dengan mengurangi pemeliharaan prematur dan hanya melaksanakan pemeliharaan yang dibutuhkan, PT PLN Batam dapat mengalokasikan anggaran pemeliharaan yang lebih efisien,

mengurangi pemborosan biaya dan meningkatkan pengelolaan sumber daya secara keseluruhan.

- b) **Pemeliharaan Berbasis Data:** CBM memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat. Dengan pemantauan parameter operasional secara real-time dan hasil BSI, keputusan pemeliharaan lebih terarah, mengurangi downtime, dan meningkatkan keandalan unit.
- c) **Adaptasi terhadap Perubahan Operasional:** CBM memungkinkan penyesuaian strategi pemeliharaan secara dinamis sesuai dengan kondisi lapangan, seperti perubahan beban, kualitas bahan bakar, atau perubahan operasional lainnya. Hal ini memberikan fleksibilitas lebih besar dibandingkan dengan pendekatan TBM yang statis.

2. Dukungan terhadap Roadmap Efisiensi BPP dan Transisi Energi

Penerapan CBM mendukung roadmap efisiensi BPP (Biaya Pokok Produksi) yang dimiliki oleh PT PLN Batam, yang berfokus pada pengelolaan aset pembangkit yang lebih efisien, serta berkontribusi terhadap transisi energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, CBM memiliki peran strategis dalam meningkatkan efisiensi pembangkit listrik, memperpanjang umur operasional unit, dan mengurangi emisi karbon yang dihasilkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

- a) **Efisiensi Pembangkitan:** Dengan mengoptimalkan penggunaan unit dan menghindari penggantian komponen yang tidak diperlukan, CBM memastikan bahwa unit-unit TM2500 beroperasi pada kinerja terbaiknya sepanjang masa operasionalnya, meningkatkan output daya dan efisiensi termal.
- b) **Pengurangan Emisi:** Dengan mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan efisiensi pembangkit, CBM berperan dalam reduksi emisi karbon, mendukung kebijakan Net Zero Emission 2060 yang telah diatur oleh PLN dan pemerintah Indonesia.
- c) **Pengelolaan Energi yang Lebih Efisien:** CBM memungkinkan pengelolaan sumber daya energi yang lebih efisien, dengan pemeliharaan yang hanya dilakukan saat diperlukan dan penghindaran penggantian komponen yang

masih layak beroperasi. Hal ini berkontribusi pada pengurangan pemborosan dan lebih banyak energi yang dapat dimanfaatkan.

3. Keterkaitan dengan Filosofi OEM GE dan Standar ISO 14224

Penerapan CBM sesuai dengan filosofi yang diterapkan oleh Original Equipment Manufacturer (OEM) General Electric (GE), yang sudah merancang unit TM2500 dengan kemampuan untuk mengadopsi pemeliharaan berbasis kondisi. GE mengakui bahwa interval pemeliharaan yang dilakukan secara time-based tidak selalu mencerminkan kondisi unit yang sebenarnya. Oleh karena itu, CBM didorong sebagai pendekatan pemeliharaan yang lebih tepat sasaran, terukur, dan berkelanjutan.

Standar ISO 14224 mengenai Reliability and Maintenance Data for Equipment juga mendukung penerapan CBM karena standar ini menekankan pentingnya pengumpulan data operasional untuk mendukung keputusan pemeliharaan berbasis kondisi yang dapat memperpanjang umur aset dan mengoptimalkan kinerja operasional. Dalam hal ini, PT PLN Batam telah berusaha untuk mengadopsi praktik terbaik yang tercantum dalam ISO 14224 dan filosofi pemeliharaan GE untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi pembangkit listrik.

4. Kontribusi terhadap Manajemen Aset Pembangkitan

CBM tidak hanya berdampak pada pengelolaan unit di PLTG MPP Batam, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap manajemen aset pembangkit listrik nasional. Dengan mengimplementasikan CBM pada unit-unit TM2500, PT PLN Batam dapat menyediakan data yang lebih akurat mengenai kondisi operasional unit yang dapat digunakan untuk perencanaan dan pengelolaan pembangkit di seluruh Indonesia. CBM memungkinkan perusahaan untuk:

- a) Mengoptimalkan siklus hidup unit pembangkit dan memperpanjang umur operasional unit-unit tersebut.
- b) Meminimalkan pengeluaran untuk pemeliharaan yang tidak perlu, serta mengurangi downtime.
- c) Memberikan data yang dapat digunakan untuk perencanaan pemeliharaan dan perbaikan jangka panjang di seluruh sistem pembangkit listrik milik PLN.

Penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) memiliki implikasi strategis yang signifikan terhadap kebijakan pemeliharaan, roadmap efisiensi BPP, serta transisi

energi yang lebih berkelanjutan. CBM memberikan keuntungan ekonomi dengan mengoptimalkan biaya pemeliharaan, memperpanjang umur operasional unit, dan mengurangi emisi karbon. Selain itu, penerapan CBM sejalan dengan filosofi OEM GE dan standar ISO 14224, yang mengutamakan pemeliharaan berbasis kondisi untuk meningkatkan keandalan operasional unit. Secara keseluruhan, CBM bukan hanya solusi yang lebih efisien untuk PT PLN Batam, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pengelolaan aset pembangkit listrik secara nasional, yang mendukung keberlanjutan energi dan tujuan Net Zero Emission 2060.

4.7 Keterbatasan Penelitian

Dalam melakukan penelitian tesis ini, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Keterbatasan-keterbatasan tersebut dapat memengaruhi keakuratan atau generalitas dari hasil analisis yang dilakukan, serta perlu diperhitungkan dalam membuat kesimpulan dan rekomendasi untuk implementasi Condition-Based Maintenance (CBM) di PT PLN Batam. Berikut adalah beberapa keterbatasan utama yang dihadapi dalam penelitian ini:

1. Ruang Lingkup Unit Terbatas pada Unit dengan Data Lengkap

Salah satu keterbatasan utama dari penelitian ini adalah ruang lingkup unit yang hanya mencakup unit-unit TM2500 yang memiliki data operasional lengkap. Tidak semua unit yang ada di PLTG MPP Batam memiliki data yang cukup terkait Total Running Hours (TRH), Borescope Inspection (BSI), dan Hot Section Replacement (HSR), yang sangat penting dalam evaluasi Condition-Based Maintenance (CBM). Oleh karena itu, beberapa unit yang belum memiliki data lengkap tidak termasuk dalam analisis ini, yang dapat menyebabkan bias dalam perhitungan penghematan biaya dan keandalan hasil analisis.

2. Tidak Mencakup Aspek Lingkungan dan Sosial

Penelitian ini berfokus pada aspek teknis dan finansial dari penerapan CBM, terutama penghematan biaya yang diperoleh melalui implementasi pendekatan ini dibandingkan dengan Time-Based Maintenance (TBM). Meskipun CBM memiliki potensi untuk mendukung tujuan Net Zero Emission 2060, analisis ini tidak mencakup aspek lingkungan secara mendalam, seperti pengurangan

emisi karbon atau pengaruh terhadap keberlanjutan energi. Selain itu, aspek sosial seperti dampak terhadap kesejahteraan pekerja yang terlibat dalam kegiatan pemeliharaan atau dampak sosial ekonomi bagi masyarakat sekitar juga tidak dijadikan fokus utama dalam penelitian ini.

3. Belum Mengkaji Implementasi Digital CBM Berbasis AI/IoT secara Penuh

Salah satu perkembangan teknologi yang semakin diperkenalkan dalam pemeliharaan berbasis kondisi adalah penerapan Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) dalam sistem pemantauan kondisi unit secara real-time. Meskipun penelitian ini telah mempertimbangkan pendekatan CBM berbasis pemantauan manual dan data historis, penerapan AI/IoT untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam Condition-Based Monitoring belum sepenuhnya dikaji. Teknologi ini memiliki potensi untuk meningkatkan kemampuan deteksi dini masalah teknis dan memberikan analisis prediktif yang lebih presisi, yang berpotensi menghasilkan penghematan biaya yang lebih besar. Oleh karena itu, penelitian ini belum sepenuhnya mengkaji implementasi digital CBM berbasis AI/IoT, yang bisa menjadi area penting untuk penelitian lanjutan.

4. Keterbatasan Data dari Lokasi yang Tidak Terwakili

Meskipun data operasional yang diperoleh mencakup 9 lokasi PLTG MPP Batam, ada kemungkinan bahwa lokasi-lokasi lainnya yang tidak tercakup dalam penelitian ini memiliki kondisi operasional yang berbeda yang bisa mempengaruhi hasil analisis. Faktor geografis, ketersediaan sumber daya, serta kualitas bahan bakar yang digunakan dapat memengaruhi kinerja unit dan biaya pemeliharaan. Oleh karena itu, penelitian ini mungkin tidak sepenuhnya mewakili kondisi di seluruh unit PLTG MPP Batam.

5. Keterbatasan Penggunaan Data Historis dan Asumsi Pemodelan

Sebagian besar data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data historis, yang mencakup informasi mengenai Total Running Hours (TRH), Borescope Inspection (BSI), dan Hot Section Replacement (HSR) untuk unit-unit yang telah beroperasi selama beberapa tahun. Penggunaan data historis ini membawa keterbatasan dalam prediksi akurat mengenai kondisi masa depan unit. Asumsi mengenai keandalan unit, penurunan kinerja komponen, dan waktu

penggantian yang didasarkan pada data historis bisa berbeda dengan kondisi operasional yang sesungguhnya di masa depan. Hal ini dapat memengaruhi akurasi estimasi penghematan biaya dan perkiraan umur operasional unit.

Meskipun penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam tentang efisiensi biaya dan keandalan operasional yang dapat dicapai dengan penerapan Condition-Based Maintenance (CBM) dibandingkan dengan Time-Based Maintenance (TBM), beberapa keterbatasan tetap perlu diperhatikan. Ruang lingkup unit yang terbatas, aspek lingkungan dan sosial yang tidak dikaji, serta belum diintegrasikannya teknologi digital seperti AI/IoT dalam pemantauan CBM merupakan area yang memerlukan penelitian lebih lanjut. Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk mengembangkan pendekatan CBM berbasis teknologi digital, serta memperluas cakupan data untuk mencakup lokasi-lokasi lain dan analisis lebih mendalam terhadap dampak lingkungan dari implementasi CBM. Tesis ini juga dapat diperluas dengan mengintegrasikan aspek sosial untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai manfaat penerapan CBM dalam manajemen aset pembangkit listrik yang lebih efisien dan berkelanjutan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis data operasional, dan evaluasi keekonomian yang telah dilakukan terhadap penerapan strategi *Condition-Based Maintenance* (CBM) pada unit Gas Turbine TM2500 di PT PLN Batam, dapat ditarik kesimpulan komprehensif sebagai berikut:

5.1.1 Kelayakan Teknis dan Ekonomis Strategi CBM

Penerapan strategi CBM pada armada turbin gas TM2500 di PT PLN Batam terbukti sangat layak untuk diimplementasikan baik dari sudut pandang teknis operasional maupun manajerial. Tantangan utama yang dijawab oleh strategi ini adalah inefisiensi pendekatan Time-Based Maintenance (TBM) yang selama ini memaksa unit untuk menjalani overhaul hanya berdasarkan angka administratif jam operasi tanpa mempertimbangkan kondisi fisik mesin yang sebenarnya.

Secara teknis, data operasional di lapangan mengonfirmasi bahwa unit yang telah melampaui batas operasional 12.500 jam standar pabrikan tetap mampu beroperasi dengan performa termodinamika yang stabil. Hal ini dimungkinkan karena degradasi material pada mesin turbin gas aero-derivatif sangat dipengaruhi oleh variabel lingkungan dan profil beban yang unik di tiap lokasi, sehingga penggunaan jam operasi linear sebagai indikator tunggal dianggap tidak lagi relevan.

Dari aspek keekonomian, kelayakan strategi CBM terlihat pada kemampuannya untuk menghindarkan perusahaan dari eksekusi belanja modal (Capital Expenditure) yang prematur. Dengan menunda jadwal overhaul pada unit yang secara teknis terbukti masih sehat, PT PLN Batam dapat mengoptimalkan arus kas dan mengalokasikan anggaran pemeliharaan pada unit lain yang memiliki urgensi perbaikan lebih tinggi berdasarkan risiko kerusakan aktual.\

Oleh karena itu, kesimpulan pertama ini menegaskan bahwa transisi menuju pemeliharaan berbasis kondisi bukan hanya sebuah eksperimen teknis, melainkan kebutuhan strategis untuk memodernisasi manajemen aset. Validasi visual melalui Borescope Inspection (BSI) memberikan jaminan keamanan bagi manajemen untuk mengambil keputusan operasional yang berani namun tetap terukur sesuai standar keselamatan kerja.

5.1.2 Dampak Finansial dan Peningkatan Keandalan

Implementasi strategi CBM memberikan dampak finansial yang masif dengan potensi penghematan biaya pemeliharaan spesifik mencapai USD 5.614.431 per tahun. Angka penghematan yang signifikan ini bersumber dari kemampuan perusahaan mengeksplorasi sisa usia pakai komponen (Remaining Useful Life) secara maksimal, sehingga memperpanjang interval antar overhaul tanpa mengorbankan integritas mesin.

Selain dari sisi pengurangan biaya langsung, CBM memberikan nilai tambah ekonomi melalui peningkatan ketersediaan unit (availability). Dengan menghindari penonaktifan unit yang sebenarnya masih laik operasi, PT PLN Batam dapat menjaga kontinuitas pasokan listrik dan memaksimalkan pendapatan dari ketersediaan daya di sistem isolated grid yang memiliki ketergantungan tinggi pada unit modular.

Strategi ini juga secara efektif memitigasi risiko over-maintenance, yakni fenomena di mana aktivitas bongkar-pasang mesin yang terlalu sering justru berpotensi memicu kegagalan baru akibat kesalahan manusia atau degradasi material selama proses perbaikan. Dengan memfokuskan tindakan hanya pada unit yang membutuhkan, keandalan armada secara keseluruhan dapat ditingkatkan secara sistematis.

Lebih jauh, manfaat ekonomi CBM mencakup pengurangan biaya logistik terkait penggantian modul yang selama ini menjadi beban berat karena karakteristik unit TM2500 yang tersebar secara geografis. Penghematan tahunan sebesar lebih dari USD 5,6 juta ini menjadi bukti kuantitatif bahwa pengelolaan

aset berbasis data jauh lebih unggul dibandingkan dengan kepatuhan buta terhadap jadwal kalender standar pabrikan.

5.1.3 Hierarki Indikator Utama dan Peran Mutlak BSI

Fondasi utama dalam pengambilan keputusan pada strategi CBM ini bertumpu pada tiga parameter operasional kritis yang dipantau melalui sistem kontrol digital. Parameter tersebut adalah Temperatur Gas Buang (T48) untuk mengukur efisiensi pembakaran, Tekanan Discharge Kompresor (PS3) sebagai indikator performa kompresi, dan level vibrasi untuk memantau integritas mekanikal rotor dan bearing.

Meskipun sensor digital memberikan tren data yang kontinu, penelitian ini menyimpulkan bahwa Borescope Inspection (BSI) memegang peranan hierarkis tertinggi sebagai validator utama dalam algoritma pengambilan keputusan. Hal ini dikarenakan sensor termodinamika sering kali tidak mampu mendeteksi kerusakan fisik mikroskopis seperti retakan mikro (thermal cracks), korosi awal, atau penipisan lapisan pelindung panas (coating loss) pada bagian internal mesin.

BSI memberikan bukti visual deterministik yang menjadi dasar hukum dan teknis yang sah dari pihak pabrikan (OEM) untuk menentukan status perpanjangan masa pakai unit. Melalui inspeksi visual yang mendalam pada area hot section, tim engineer dapat secara akurat mengklasifikasikan unit ke dalam status serviceable atau wajib menjalani overhaul.

Kesimpulannya, peranan BSI berfungsi sebagai "The Gatekeeper" atau penentu akhir (go/no-go decision) yang menjembatani antara data numerik sensor dan realitas fisik komponen. Tanpa validasi visual dari BSI, perpanjangan interval operasi berdasarkan parameter suhu dan tekanan saja dianggap mengandung risiko tinggi yang dapat memicu kegagalan katastropik secara mendadak.

5.1.4 Analisis Kelayakan Investasi (CBA) yang Unggul.

Evaluasi finansial komparatif menggunakan metode Cost-Benefit Analysis (CBA) secara meyakinkan mengonfirmasi superioritas nilai ekonomi strategi CBM dibandingkan TBM. Hasil perhitungan menunjukkan nilai Benefit-Cost Ratio (BCR) sebesar 2,36, yang secara sederhana berarti setiap satu dolar

yang diinvestasikan untuk sistem monitoring CBM akan menghasilkan manfaat balik lebih dari dua kali lipat bagi perusahaan.

Superioritas ini diperkuat dengan proyeksi nilai Net Present Value (NPV) yang sangat positif, di mana akumulasi nilai bersih saat ini diestimasikan mencapai USD 56 juta dalam horizon waktu sembilan tahun. Angka NPV yang masif ini memberikan kepastian bagi pemangku kepentingan bahwa transisi menuju CBM adalah investasi strategis yang memberikan keamanan finansial jangka panjang bagi organisasi.

Selain BCR dan NPV, tingkat pengembalian internal atau Internal Rate of Return (IRR) dari strategi CBM tercatat secara signifikan melampaui biaya modal (cost of capital) perusahaan. Hal ini mengukuhkan posisi CBM sebagai opsi kebijakan pemeliharaan yang paling menguntungkan (profitable) dan memiliki ketahanan terhadap fluktuasi biaya operasional di masa mendatang.

5.1.5 Batasan Fokus Efisiensi Biaya dan Variabel Kinerja Jangka Panjang

Penelitian ini berhasil membuktikan secara kuantitatif bahwa transisi ke strategi Condition-Based Maintenance (CBM) mampu menghasilkan penghematan biaya pemeliharaan langsung (Direct Cost Avoidance) yang sangat signifikan, yakni sebesar USD 5.614.431 per tahun,. Efisiensi ini dicapai melalui reduksi beban biaya tahunan sebesar 70,23%, di mana realisasi biaya dengan metode CBM hanya memerlukan USD 2.380.000 dibandingkan proyeksi TBM sebesar USD 7.994.431,. Angka ini memberikan landasan ekonomi yang kuat bagi manajemen untuk menunda belanja modal (Capex) pemeliharaan pada unit yang secara fisik terbukti masih laik operasi.

Namun demikian, perlu ditegaskan bahwa analisis ekonomi dalam tesis ini difokuskan secara murni pada penghematan biaya kapital pemeliharaan langsung, seperti biaya inspeksi BSI dan biaya Hot Section Replacement (HSR) yang bernilai rata-rata USD 2,2 juta per kejadian,. Fokus ini diambil untuk menjaga objektivitas nilai penghematan biaya tetap yang dapat diukur secara eksak dari sisi akuntansi manajemen aset,. Dengan demikian, angka manfaat ekonomi yang

disajikan merupakan representasi dari penghindaran biaya perbaikan besar yang prematur,.

Di sisi lain, tesis ini mengakui adanya batasan dalam cakupan analisis keekonomian, di mana perhitungan manfaat belum memperhitungkan variabel degradasi heat rate (efisiensi bahan bakar spesifik) serta penurunan daya output (derating) yang mungkin terjadi selama periode perpanjangan masa pakai aset. Meskipun parameter efisiensi termal dipantau secara teknis melalui sensor T48 dan PS3,, dampak finansial dari potensi kenaikan konsumsi bahan bakar akibat penundaan overhaul tidak dimasukkan ke dalam model Cost-Benefit Analysis (CBA) guna menghindari kompleksitas variabel asuntif operasional.

Selain itu, evaluasi ini dibatasi pada kurun waktu historis dan belum mempertimbangkan proyeksi kondisi mesin jangka panjang secara simulatif atau menggunakan pemodelan kegagalan probabilistik. Strategi penundaan overhaul dalam tesis ini sepenuhnya bergantung pada validitas visual BSI sebagai "Gatekeeper" saat ini dan tidak mencakup pengembangan sistem pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan (AI) yang dapat memodelkan laju kerusakan material di masa depan,. Oleh karena itu, hasil penghematan ini harus dipandang sebagai manfaat ekonomi dari sisi biaya kapital, dengan tetap memerlukan pengawasan teknis yang ketat terhadap performa termodinamika unit secara berkelanjutan,.

Sebagai penutup, seluruh parameter kuantitatif ini membuktikan bahwa CBM bukan sekadar cara untuk menghemat biaya, melainkan strategi manajemen aset yang paling efisien untuk menekan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik di PT PLN Batam. Keberhasilan penelitian ini diharapkan menjadi landasan bagi standarisasi baru dalam pengelolaan pembangkit turbin gas modular di seluruh Indonesia demi tercapainya keandalan energi nasional yang berkelanjutan

5.2 Rekomendasi

Berdasarkan kesimpulan penelitian dan evaluasi komprehensif yang telah dilakukan, penulis merumuskan sejumlah saran strategis yang ditujukan bagi aspek implementasi praktis di perusahaan maupun pengembangan akademik lanjutan:

5.2.1 Saran Implementatif (Bagi PT PLN Batam)

1. Formalisasi BSI sebagai "Gatekeeper" dalam SOP Pemeliharaan

Manajemen disarankan untuk merevisi *Standard Operating Procedure* (SOP) pemeliharaan unit TM2500 dengan menjadikan *Borecope Inspection* (BSI) sebagai prasyarat wajib (*mandatory gatekeeper*) sebelum memutuskan pelaksanaan *overhaul*. Keputusan *overhaul* sebaiknya tidak lagi didasarkan semata-mata pada *Total Running Hour* (TRH) 12.500 jam, melainkan pada matriks kondisi aktual yang divalidasi oleh laporan visual BSI. Hal ini untuk mencegah *over-maintenance* dan memaksimalkan *Remaining Useful Life* (RUL) aset.

2. Reinvestasi Penghematan untuk Modernisasi Monitoring

Mengingat potensi penghematan biaya pemeliharaan yang mencapai USD 5,6 juta per tahun, disarankan agar sebagian dari efisiensi tersebut dialokasikan untuk investasi pada sistem *online condition monitoring* yang lebih canggih. Pemasangan sensor tambahan yang terintegrasi dengan *Artificial Intelligence* (AI) untuk memprediksi tren T48 dan PS3 secara *real-time* akan meningkatkan akurasi deteksi dini degradasi, mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual, dan memitigasi risiko kegagalan katastropik pada unit yang masa pakainya diperpanjang.

3. Standardisasi Kompetensi Analisis Data

Perlu dilakukan program peningkatan kompetensi (*capacity building*) bagi personel teknik di seluruh unit MPP terkait analisis parameter termodinamika turbin gas. Kemampuan untuk menginterpretasikan korelasi antara data vibrasi, tekanan kompresor, dan efisiensi termal sangat krusial agar strategi CBM dapat dijalankan secara mandiri dan konsisten di sembilan lokasi yang tersebar.

5.2.2 Saran Akademik (Untuk Penelitian Lanjutan)

1. Pengembangan Model Prediktif Berbasis Machine Learning

Penelitian ini masih terbatas pada analisis data historis dan observasi manual. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan algoritma *Machine Learning* yang mampu memodelkan laju degradasi material *hot section*

berdasarkan variabel operasi (beban, jenis bahan bakar, frekuensi *start-stop*). Hal ini akan menyempurnakan prediksi sisa usia pakai (RUL) dengan tingkat presisi yang lebih tinggi.

2. Analisis Dampak Lingkungan (Life Cycle Assessment)

Disarankan untuk memperluas cakupan analisis *Cost-Benefit Analysis* (CBA) dengan memasukkan variabel dampak lingkungan. Kajian mengenai seberapa besar pengurangan limbah *spare part* (logam berat) dan emisi karbon yang dihasilkan dari perpanjangan interval *overhaul* akan memberikan perspektif keberlanjutan (*sustainability*) yang lebih utuh dalam strategi CBM.

3. Kajian Komparatif Bahan Bakar

Mengingat adanya unit yang beroperasi dengan HSD dan Gas, penelitian lanjutan dapat memfokuskan pada analisis komparatif laju degradasi antara kedua jenis bahan bakar tersebut. Hasilnya dapat digunakan untuk menyusun faktor koreksi spesifik dalam penentuan interval inspeksi yang lebih presisi untuk masing-masing tipe bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Betz, I. Papaioannou, T. Zeh, D. Hespig, T. Krauss, and D. Straub, “Data-Driven Predictive Maintenance for Gas Distribution Networks,” *ASCE ASME J Risk Uncertain Eng Syst A Civ Eng*, vol. 8, no. 2, Jun. 2022, doi: 10.1061/AJRUA6.0001237.
- [2] T. A. Al Ameer, M. N. Bin Ab Rahman, and N. Bin Muhamad, “Maintenance Management Cost Analysis using Strategy Optimization for Electric Power Plant,” *Journal of Engineering and Science Research*, vol. 7, no. 3, pp. 1–8, Jun. 2023, doi: 10.26666/rmp.jesr.2023.3.1.
- [3] J. F. Andersen and B. F. Nielsen, “A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for multi-component systems,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 256, p. 110759, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ress.2024.110759.
- [4] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [5] F. E. Ciarapica and G. Giacchetta, “Managing the condition-based maintenance of a combined-cycle power plant: An approach using soft computing techniques,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 19, no. 4, pp. 316–325, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.jlp.2005.07.018.
- [6] Nisa Isrofi, “EVALUASI TIME BASED MAINTENANCE (TBM) DALAM RANGKA MENURUNKAN BIAYA MAINTENANCE,” 2018.
- [7] R. Kautsar Ilmi, Y. Sukrawan, and T. Permana, “CONDITION BASED MONITORING IMPROVES COMPONENT DURABILITY IN HEAVY EQUIPMENT MAINTENANCE,” 2024.
- [8] Y. Koerniawan and A. Wahyu, “Literature review : Conditional based maintenance in manufacture industry,” *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 7, no. 4, pp. 2288–2297, Oct. 2024, doi: 10.31004/jutin.v7i4.34377.
- [9] General Electric, “LM2500+G4 PT PELAYANAN LISTRIK NASIONAL BATAM Fleet Maintenance Program (Introduction),” Jun. 2020.

- [10] Ignatius Deradjad Pranowo, “Sistem dan Manajemen Pemeliharaan,” 2019.
- [11] ATH-THOLLA’U AHMAD ALDIUM, “PENGARUH COMBUSTION INSPECTION, TURBINE INSPECTION, DAN MAJOR INSPECTION TERHADAP UNJUK KERJA TURBIN GAS UNIT 1.2 PLTGU PT. PJB UP GRESIK,” 2018.
- [12] D. P. Prabhakar and J. V. Raj, “CBM, TPM, RCM and A-RCM-A Qualitative Comparison of Maintenance Management Strategies,” 2014.
- [13] R. Kautsar Ilmi, Y. Sukrawan, and T. Permana, “CONDITION BASED MONITORING IMPROVES COMPONENT DURABILITY IN HEAVY EQUIPMENT MAINTENANCE,” 2024.
- [14] Jonas Aust, Sam Shankland, Dirk Pons, Ramakrishnan Mukundan, and Antonija Mitrovic, “Automated Defect Detection in Turbine Blades Inspection,” Aug. 2021.
- [15] P. M. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/C2009-0-64242-2.
- [16] General Electric, “Lm2500+g4 pt pelayanan listrik nasional batam fleet maintenance program (introduction).,” 2020.
- [17] E. Anselmi Palma, S. Kisson, G. Hann, P. Pilidis, and V. Pachidis, “Engine strip and build lab: a practical approach to learning gas turbine engines,” *The Aeronautical Journal*, vol. 129, no. 1331, pp. 144–155, Jan. 2024, doi: 10.1017/aer.2024.102.
- [18] F. Azis, N. A. Parawangsa, N. S. Fitri, and Aswin. A. Salam, *Buku Ajar Turbin dan Generator*. 2021. Accessed: Jan. 14, 2026. [Online]. Available: <https://repository.penerbiteureka.com/media/publications/588868-buku-ajar-turbin-dan-generator-2a9dd475.pdf>
- [19] H. Shang, C. Sun, J. Liu, X. Chen, and R. Yan, “Deep learning-based borescope image processing for aero-engine blade in-situ damage detection,” *Aerosp Sci Technol*, vol. 123, p. 107473, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ast.2022.107473.
- [20] C. L. Vinoya, A. T. Ubando, and A. B. Culaba, “Life cycle analysis of a network of small modular reactors,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1372, no. 1, p. 012059, Jul. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1372/1/012059.

- [21] General Electric Company, “TM2500+ Gas Turbine Generator Package Familiarization & Operations Course PLN Batam,” 2016.
- [22] M. Molęda, B. Małysiak-Mrozek, W. Ding, V. Sunderam, and D. Mrozek, “From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 5970, Jun. 2023, doi: 10.3390/s23135970.
- [23] J. Liu, M. Bai, Z. Long, J. Liu, Y. Ma, and D. Yu, “Early Fault Detection of Gas Turbine Hot Components Based on Exhaust Gas Temperature Profile Continuous Distribution Estimation,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 5950, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13225950.
- [24] GE Power, “TM2500+ Gas Turbine Generator Package Maintenance Course PLN Batam,” 2016.
- [25] Jonas Aust, SamShankland, Dirk Pons, Ramakrishnan Mukundan, and Antonnija Mitrovic, “Automated Defect Detection and Decision Support in Gas Turbine Blade Inspection,” Aug. 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace8020030>.
- [26] VBR Turbine Partners, “Independent periodic health inspection - LM2500(+),” 2020.

Daftar Riwayat Hidup



A. Data Diri

Nama Lengkap : Arif Budiman
Tempat Tanggal Lahir : Padang Panjang/ 14 Februari 1985
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Agama : Islam
Kewarganegaraan : Indonesia

B. Pendidikan

2003-2006 : D3 Listrik Politeknik UNAND Padang (Teknik Listrik)
2008-2010 : S1 Elektro Universitas Riau Kepulauan (Teknik Elektro)
2023 – 2026 : Pasca Sarjana Magister Teknik IT PLN
(*Smartgrid and Renewable Energy*)

C. Pekerjaan

2007 – 2016 : Officer Perencanaan Distribusi
2016 – 2021 : Supervisor Pemeliharaan Pembangkit
2021 – 2025 : Manager Unit Pelaksana MPP Bangka Belitung
2025-2026 : Manager Unit Pelaksana PLTGU Tanjung Uncang

D. Sertifikasi dan Pelatihan External

2025-2027 : Sertifikasi BNSP QRMP
2020 -2021 : Pelatihan Digital Leadership Cornell University

	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	NILAI SIDANG TUGAS AKHIR	Level	2
		Revisi ke -	3

PERBAIKAN NASKAH TESIS

Tanggal Ujian Sidang : 14 FEBRUARI 2026

Nama Mahasiswa : ARIF BUDIMAN

NIM : 2023-10-027

Program Studi : S2 TEKNIK ELEKTRO

Fakultas / Sekolah : SEKOLAH PASCASARJANA

Judul Tugas Akhir : KAJIAN KELAYAKAN CONDITION BASE MAINTENANCE (CBM) TERHADAP INTERVAL OVERHAUL TM 2500 PT PLN
BATAM

Saran Perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut :

1. Agar dijelaskan sequence / urutan pelaksanaan assesment CBM secara detail
2. Tolong dijelaskan metode dan tools apa saja yang dipakai dalam CM selain metode BSI
3. Agar dibatasi benefit ekonomi terbatas dari berkurangnya biaya pemeliharaan tidak memperhitungkan perubahan kinerja gas turbine akibat delay jadwal pemeliharaan seperti perubahan heat rate dll.
4. Agar ditambahkan secara jelas mengapa dalam kesimpulan CBM lebih baik secara ekonomis dibandingkan dengan TBM (diuraikan secara kuantitatif)

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesaikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **21 Februari 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tesisnya**, maka mahasiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa



ARIF BUDIMAN

Anggota Penguji



Dr. Ir. Zainal Arifin., ST., MBA

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal **21 Februari 2026**

Mahasiswa



ARIF BUDIMAN

Anggota Penguji



Dr. Ir. Zainal Arifin., ST., MBA



INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
Tanggal	10 Februari 2025
Level	2
Revisi ke -	3

NILAI SIDANG TUGAS AKHIR

PERBAIKAN NASKAH TESIS

Tanggal Ujian Sidang : 14 FEBRUARI 2026

Nama Mahasiswa : ARIF BUDIMAN

NIM : 2023-10-027

Program Studi : S2 TEKNIK ELEKTRO

Fakultas / Sekolah : SEKOLAH PASCASARJANA

Judul Tugas Akhir : KAJIAN KELAYAKAN CONDITION BASE MAINTENANCE (CBM) TERHADAP INTERVAL OVERHAUL TM 2500 PT PLN
BATAM

Saran Perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut :

Perlu mereview kembali isi tesis dari bab 1 sd bab 5 terkait penulisan, gambar, tabel dan penomoran rumus

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesaikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **21 Februari 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tesisnya**, maka mahasiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa

ARIF BUDIMAN

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Marwan Rosyadi., ST., MT

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal **21 Februari 2026**

Mahasiswa

ARIF BUDIMAN

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Marwan Rosyadi., ST., MT

	INSTITUT TEKNOLOGI PLN	Kode	FO-PD-A03-2-003-3-008
		Tanggal	10 Februari 2025
	NILAI SIDANG TUGAS AKHIR	Level	2
		Revisi ke -	3

PERBAIKAN NASKAH TESIS

Tanggal Ujian Sidang : 14 FEBRUARI 2026
 Nama Mahasiswa : ARIF BUDIMAN
 NIM : 2023-10-027
 Program Studi : S2 TEKNIK ELEKTRO
 Fakultas / Sekolah : SEKOLAH PASCASARJANA

Judul Tugas Akhir : KAJIAN KELAYAKAN CONDITION BASE MAINTENANCE (CBM) TERHADAP INTERVAL OVERHAUL TM 2500 PT PLN BATAM
 :

Saran Perbaikan naskah tugas akhir adalah sebagai berikut :

1. Tabel perbandingan biaya pemeliharaan Tahunan (simulasi vs realisasi)??
2. Penerapan strategi CBM pada unit TM2500 terbukti layak secara teknis dan ekonomis?? terbukti layaknya dari mana??
Jelaskan pada isi di tesisnya? Parameter2 apa saja yg dipertimbangkan dan standarnya berapa
3. catatan-catatan lain saat sidang

Jangka waktu untuk perbaikan naskah tugas akhir diatas harus diselesaikan paling lambat satu minggu setelah tanggal ujian yakni pada tanggal **21 Februari 2026**

Apabila dalam jangka waktu tersebut mahasiswa tersebut diatas tidak dapat menyelesaikan **REVISI tesisnya**, maka mahasiswa harus kembali mengulang sidang

Mahasiswa

Dosen Pembimbing

Ketua Penguji





ARIF BUDIMAN

Prof. Ir. Syamsir Abduh., MM., Ph.D., IPU., ASEAN.Eng

Dr. Ir. Retno Aita Diantari., ST., MT.,
IPM., ASEAN.Eng

Tugas akhir telah selesai diperbaiki pada tanggal **21 Februari 2026**

Mahasiswa

Dosen Pembimbing

Ketua Penguji





ARIF BUDIMAN

Prof. Ir. Syamsir Abduh., MM., Ph.D., IPU., ASEAN.Eng

Dr. Ir. Retno Aita Diantari., ST., MT.,
IPM., ASEAN.Eng

LEMBARAN BIMBINGAN TESIS

Nama mahasiswa : **Arif Budiman**
 NIM : 202310027
 Program studi : Magister Teknik Elektro
 Nama dosen pembimbing 1 : **Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D.**
 Nama dosen pembimbing 2 : **Dr.Eng. Marwan Rosyadi, ST, MT.**
 Judul Tesis : Kajian Kelayakan Condition Base Maintenance (CBM)
 Terhadap Interval Overhaul TM2500 PT PLN Batam.

NO	Tanggal	Materi bimbingan	Tanda tangan
1.	21 April 2025	Pembahasan Bab 1-3. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
2.	21 April 2025	Pembahasan Bab 1-3 lanjutan. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
3.	22 April 2025	Mempertajam landasan teori.	

		Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
4.	26 April 2025	Finalisasi Bab 1 dan 3. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
5.	19 Sept 2025	Pembahasan GAP terhadap penelitian sebelumnya. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
6.	22 Sept 2025	Pembahasan Daftar Pustaka mengacu standar yang ditetapkan. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
7.	25 Sept 2025	Evaluasi penyajian gambar/grafik/tabel di halaman bab. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
8.	29 Sept 2025	Penjelasan konsep dasar, jenis, dan tipe Turbin Gas. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T.	 

		Tempat : Daring lewat online meeting	
9.	30 Sept 2025	Pembuatan matriks perbandingan jenis maintenance. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
10.	01 Okt 2025	Pencantuman nomor persamaan. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
11.	03 Okt 2025	Arahan lanjut ke Bab 4. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
12.	06 Okt 2025	Detail data primer dan sekunder pada kajian Bab 3. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat online meeting	 
13.	08 Okt 2025	Penyesuaian Flowchart metode dan desain penelitian. Dengan Pembimbing I: Prof. Ir. Syamsir Abduh, MM, Ph.D. dan Pembimbing 2 : Dr. Eng. Marwan Rosyadi, S.T., M.T. Tempat : Daring lewat Zoom meeting	 

LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan BSI MPP PT PLN Batam

LAMPIRAN

Lampiran 2 **Work Pakage Borescope Inspection TM2500**

LAMPIRAN

Lampiran 3 Fleet Maintenace TM 2500

LAMPIRAN

Lampiran 4 Loogsheet Parameter TM 2500

