

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.

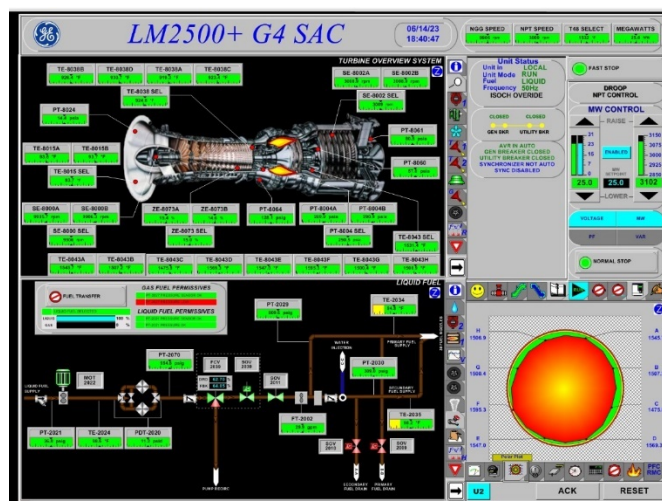
Sebagai mesin berbasis LM2500+G4, TM2500 menawarkan kapabilitas start-up dari cold start hingga full load dalam waktu kurang dari 10 menit. Unit ini mampu menghasilkan output daya sekitar 31,3 MW pada kondisi ISO standar (15°C , sea level), dengan efisiensi termal simple cycle antara 39% hingga 41%. 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).

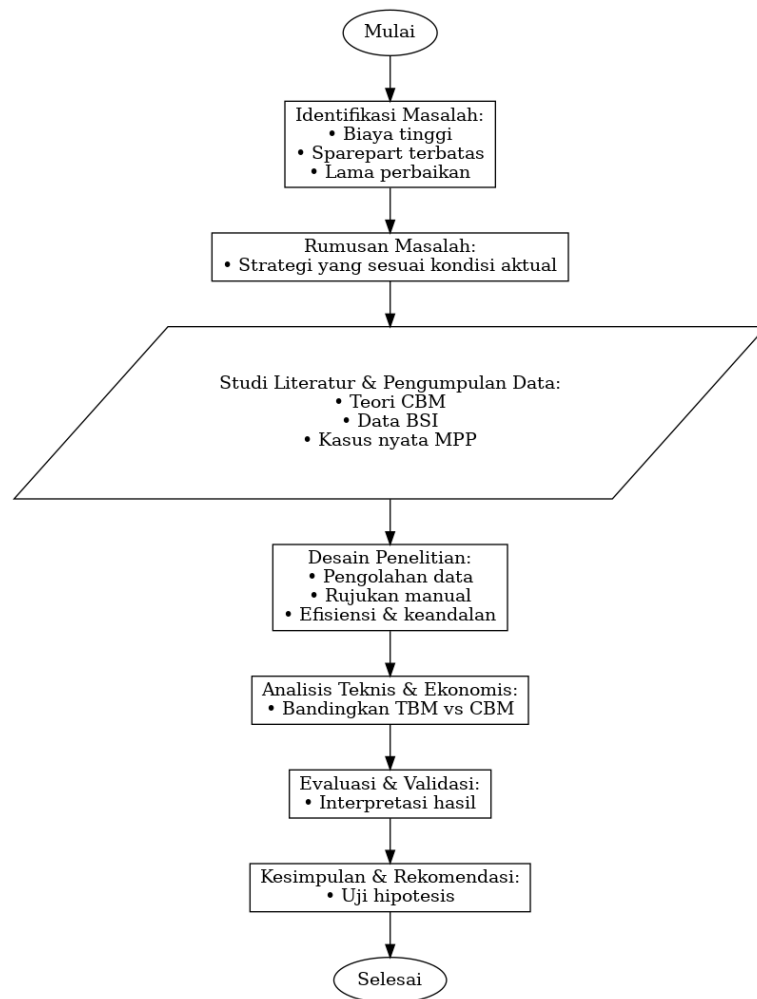
5. Tahap 5: Protokol Pemantauan Intensif

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