

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Penelitian terkait evaluasi kebutuhan tenaga kerja (*manpower*) dan perencanaan sumber daya manusia dalam kegiatan pemeliharaan telah banyak dilakukan pada berbagai sektor industri. **Auwalia dan Hayati** pada penelitiannya yang berjudul Analisis hubungan *manhours* dan *manpower* pada divisi perbaikan struktur pesawat di industri MRO melakukan penelitian mengenai hubungan antara *manhours* dan *manpower* pada divisi perbaikan struktur pesawat di industri *maintenance, repair, and overhaul (MRO)*. Penelitian tersebut menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara *manhours* dengan jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pekerjaan pemeliharaan. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada industri penerbangan dan belum mengkaji penerapan metode evaluasi *manpower* pada sektor pembangkit listrik, khususnya pemeliharaan *gas turbine* yang memiliki karakteristik beban kerja dan kompleksitas teknis yang berbeda (Auwalia dan Hayati, 2025).

Penelitian lain dilakukan oleh **Al Ghifar et al.** yang berfokus pada optimalisasi perencanaan *manpower* berbasis *workload* profile dalam menghadapi fluktuasi produksi di industri manufaktur. Studi ini menekankan pentingnya penyesuaian jumlah tenaga kerja terhadap perubahan beban kerja untuk meningkatkan efisiensi operasional. Namun, pendekatan yang digunakan lebih diarahkan pada aktivitas produksi dan belum secara spesifik diterapkan pada kegiatan pemeliharaan periodik peralatan kritis seperti *gas turbine* di pembangkit listrik, sehingga masih terdapat peluang untuk mengadaptasi konsep *workload-based manpower planning* pada konteks pemeliharaan pembangkit (Al Ghifar et al, 2025)

Pendekatan optimasi tenaga kerja juga dikembangkan melalui metode simulasi, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian yang dipublikasikan pada **Computers & Industrial Engineering**, yang mengusulkan optimasi konfigurasi tenaga kerja pada departemen pemeliharaan multi-divisi. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan tenaga kerja yang tepat dapat menurunkan biaya dan meningkatkan efektivitas pemeliharaan. Meskipun demikian, objek penelitian masih bersifat umum pada mesin industri dan belum secara spesifik membahas *gas turbine* pembangkit listrik dengan

pendekatan *manhours* dan analisis pekerjaan yang detail (Computers & Industrial Engineering, 2024).

Dalam konteks pemeliharaan turbin di sektor ketenagalistrikan, **Utomo et al.**, mengkaji penjadwalan pemeliharaan turbin pada pembangkit listrik tenaga uap menggunakan metode simulasi Monte Carlo. Penelitian ini menekankan pentingnya perencanaan pemeliharaan untuk menghindari gangguan operasi yang tidak terencana. Namun demikian, fokus penelitian lebih diarahkan pada penjadwalan pemeliharaan, tanpa membahas secara mendalam evaluasi kebutuhan *manpower* dan keseimbangan antara beban kerja dengan kapasitas tenaga kerja (Utomo et al. , 2025)

Penelitian terkini juga mengarah pada pemanfaatan data historis untuk peramalan kebutuhan tenaga kerja, seperti yang dilakukan dalam studi *Workforce Forecasting in Maintenance Work* pada **Journal of Building Engineering**, yang menggunakan pendekatan *machine learning* dan *Long Short-Term Memory (LSTM)* untuk memprediksi kebutuhan tenaga kerja pada pemeliharaan bangunan. Studi ini menunjukkan bahwa analisis data historis dapat meningkatkan akurasi perencanaan tenaga kerja. Namun, penerapan metode tersebut masih terbatas pada sektor pemeliharaan bangunan dan belum dikaji pada pemeliharaan peralatan berisiko tinggi dan berkompleksitas tinggi seperti *gas turbine* pembangkit listrik (Journal of Building Engineering, 2024).

Berdasarkan tinjauan pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai evaluasi kebutuhan *manpower* telah berkembang pada berbagai sektor industri dengan beragam pendekatan, seperti analisis *manhourss*, *workload-based planning*, simulasi, dan estimasi berbasis data. Namun, hingga saat ini masih terdapat celah penelitian terkait penerapan evaluasi kebutuhan *manpower* yang komprehensif pada pemeliharaan periodik *gas turbine* di pembangkit listrik, khususnya yang mengintegrasikan *Work Breakdown Structure (WBS)*, analisis *manhours*, dan data historis pemeliharaan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat mengisi celah tersebut dengan menyajikan model evaluasi kebutuhan *manpower* yang lebih aplikatif, berbasis data, dan sesuai dengan karakteristik pemeliharaan *gas turbine* MHI 701F3 dan F4 di PT. PLN Indonesia Power – Unit Bisnis Pemeliharaan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) adalah jenis pembangkitan yang mengonversi energi kimia dari bahan bakar (gas alam atau bahan bakar minyak cair tertentu) menjadi energi mekanik melalui proses pembakaran, yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Komponen utama PLTG terdiri dari kompresor, ruang bakar (combustor), dan turbin yang terpasang pada satu poros (*single shaft*) dengan generator (Boyce, 2012).

Prinsip dasar operasional PLTG terletak pada hubungan antara turbin dan generator. Ketika turbin berputar akibat ekspansi gas hasil pembakaran, generator yang berada pada poros yang sama ikut berputar. Putaran rotor di dalam stator generator menghasilkan perpotongan garis gaya magnet yang memicu induksi elektromagnetik sesuai dengan hukum Faraday, sehingga tercipta beda potensial dan aliran listrik (Giampaolo, 2014).

2.2.1.1 Siklus Brayton (Siklus Udara Terbuka)

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) didasarkan pada *Siklus Brayton*, yaitu siklus termodinamika yang digunakan pada mesin turbin gas dengan fluida kerja berupa udara dan gas hasil pembakaran. Siklus ini sering disebut sebagai siklus udara terbuka (*open cycle*) karena udara diambil dari atmosfer dan gas buang dilepaskan kembali ke lingkungan setelah proses ekspansi. Siklus Brayton menjadi dasar analisis performa turbin gas, terutama dalam menentukan efisiensi termal, kerja kompresor, dan kerja turbin.

Menurut Moran dkk. (2014), siklus Brayton ideal terdiri dari empat proses termodinamika utama yang berlangsung secara kontinu, yaitu kompresi, pembakaran, ekspansi, dan pembuangan panas.

Proses pada Siklus Brayton

1. Kompresi Isentropik (1–2)

Udara dari atmosfer dihisap masuk ke dalam kompresor dan dikompresi secara adiabatik (isentropik). Pada proses ini tekanan dan temperatur udara meningkat secara signifikan. Energi mekanik yang dibutuhkan kompresor berasal dari poros turbin yang terhubung secara langsung. Proses kompresi ini sangat menentukan kinerja siklus karena rasio tekanan kompresor mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan.

2. Penambahan Panas Isobarik (2–3)

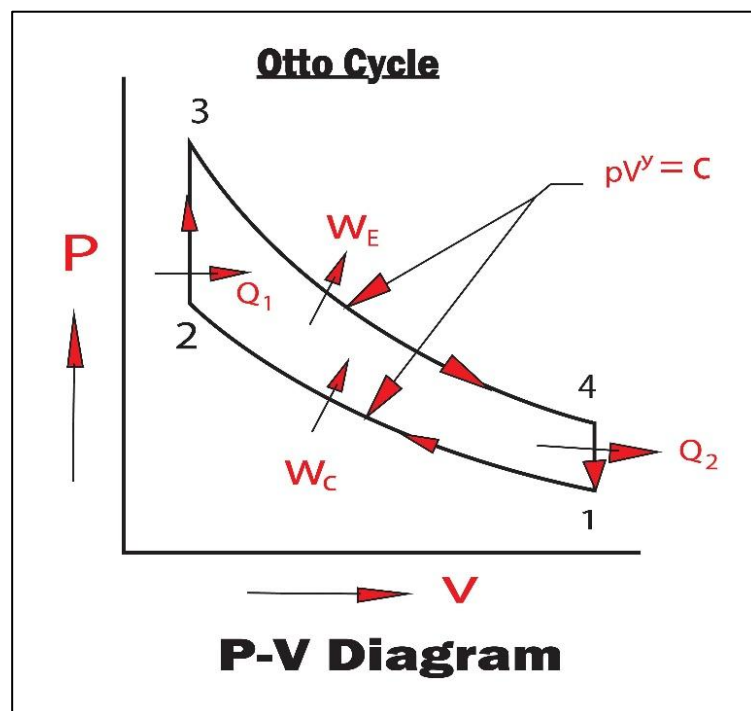
Udara bertekanan tinggi dari kompresor masuk ke ruang bakar dan bercampur dengan bahan bakar (umumnya gas alam). Proses pembakaran terjadi pada tekanan konstan (isobarik), sehingga temperatur gas meningkat drastis dan menghasilkan energi panas yang tinggi. Energi termal ini menjadi sumber utama untuk menghasilkan kerja turbin.

3. Ekspansi Isentropik (3–4)

Gas panas hasil pembakaran mengalir melalui turbin dan mengalami ekspansi secara isentropik. Energi kinetik gas digunakan untuk memutar sudu turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Sebagian energi mekanik digunakan untuk menggerakkan kompresor, sedangkan sisanya digunakan untuk memutar generator listrik.

4. Pembuangan Panas (4–1)

Setelah melewati turbin, gas buang masih memiliki temperatur yang cukup tinggi dan kemudian dilepaskan ke atmosfer melalui saluran buang (exhaust stack). Pada PLTG siklus sederhana, panas gas buang ini tidak dimanfaatkan kembali, sehingga efisiensi sistem menjadi lebih rendah dibandingkan sistem siklus gabungan.



Gambar 2.1 Siklus Brayton

Efisiensi Siklus Brayton

Efisiensi termal siklus Brayton ideal dipengaruhi oleh rasio tekanan kompresor (pressure ratio) dan temperatur maksimum turbin. Secara teoritis, efisiensi siklus Brayton ideal dapat dinyatakan sebagai fungsi rasio tekanan kompresor, di mana peningkatan rasio tekanan akan meningkatkan efisiensi hingga batas tertentu yang ditentukan oleh material turbin dan temperatur operasi.

Dalam praktiknya, siklus Brayton pada turbin gas nyata tidak sepenuhnya ideal karena terdapat:

- rugi tekanan pada ruang bakar,
- efisiensi kompresor dan turbin yang kurang dari 100%,
- kehilangan panas,
- keterbatasan temperatur material turbin.

Oleh karena itu, efisiensi PLTG siklus sederhana umumnya berada pada kisaran 30–40%, sedangkan pemanfaatan panas buang dalam sistem siklus gabungan dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan.

2.2.1.2 Komponen Utama Sistem PLTG

- Kompresor Aksial (*Axial Compressor*)

Kompresor berfungsi untuk menyuplai udara dalam jumlah besar dan bertekanan tinggi untuk mendukung proses pembakaran serta sebagai sistem pendingin komponen turbin. Efisiensi kompresor sangat dipengaruhi oleh kebersihan sudu-sudu kompresor; penumpukan debu (*fouling*) dapat menurunkan rasio tekanan dan meningkatkan konsumsi bahan bakar (Saravanamuttoo et al., 2017).

- Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Di dalam ruang bakar, energi kimia bahan bakar diubah menjadi energi panas. Ruang bakar pada unit besar seperti MHI 701F dirancang untuk meminimalkan emisi gas buang melalui teknologi Low NO_x Burner. Area ini merupakan titik dengan beban termal tertinggi dalam keseluruhan sistem (Lefebvre & Ballal, 2010).

- Turbin Gas (*Gas turbine*)

Turbin adalah komponen tempat terjadinya perubahan energi gas menjadi energi putar. Sudu-sudu turbin harus mampu menahan temperatur ekstrem yang sering kali melebihi titik leleh material dasarnya. Oleh karena itu, sudu turbin dilengkapi dengan lapisan keramik (Thermal Barrier Coating) dan sistem pendinginan udara internal (Soares, 2014).

- Generator

Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari poros turbin menjadi energi listrik. Sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik, putaran rotor yang menghasilkan medan magnet di dalam kumparan stator akan membangkitkan energi listrik dalam bentuk arus bolak-balik (AC) (Nag, 2008).

2.2.1.3 Karakteristik Operasional PLTG

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan pembangkit termal yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak utama generator listrik. Sistem ini bekerja berdasarkan siklus Brayton, yaitu proses kompresi udara, pembakaran bahan bakar, dan ekspansi gas panas pada turbin untuk menghasilkan energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. PLTG dikenal sebagai pembangkit dengan fleksibilitas operasi yang tinggi, terutama dalam hal kemampuan start-up yang cepat dan respons beban yang baik.

Salah satu keunggulan utama PLTG adalah waktu *start-up* yang relatif singkat, yaitu sekitar 10–30 menit untuk mencapai kondisi beban penuh. Karakteristik ini menjadikan PLTG sangat cocok digunakan sebagai unit peaker, yaitu pembangkit yang dioperasikan saat terjadi kenaikan beban sistem secara tiba-tiba atau pada kondisi beban puncak. Dalam sistem tenaga listrik modern, kemampuan respons cepat PLTG berperan penting dalam menjaga stabilitas frekuensi dan keandalan sistem tenaga listrik, terutama pada sistem yang memiliki penetrasi energi terbarukan yang tinggi dan bersifat intermiten (El-Wakil, 1984).

Selain itu, PLTG memiliki beberapa karakteristik operasional lainnya, antara lain:

- Ukuran instalasi relatif lebih kompak dibandingkan pembangkit uap konvensional.
- Waktu konstruksi lebih singkat, sehingga cocok untuk penambahan kapasitas daya dalam waktu cepat.

- Kemampuan ramp rate tinggi, sehingga dapat mengikuti perubahan beban sistem dengan cepat.
- Sistem operasi yang relatif sederhana dibandingkan pembangkit berbasis siklus uap.

Namun demikian, PLTG memiliki efisiensi termal yang relatif lebih rendah, umumnya berada pada kisaran 30–40% pada operasi siklus sederhana (*simple cycle gas turbine*). Hal ini disebabkan oleh panas gas buang turbin yang masih tinggi (sekitar 450–600°C) tidak dimanfaatkan kembali, sehingga energi termal yang tersedia tidak digunakan secara optimal.

Untuk meningkatkan efisiensi tersebut, PLTG sering dikombinasikan dengan pembangkit uap dalam sistem PLTGU (*Combined Cycle Power Plant*). Pada sistem ini, panas gas buang turbin gas dimanfaatkan oleh *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin uap tambahan. Dengan konfigurasi ini, efisiensi pembangkit dapat meningkat hingga 55–60%, sehingga konsumsi bahan bakar menjadi lebih ekonomis dan emisi lebih rendah (El-Wakil, 1984).

Dalam konteks operasi pembangkit, karakteristik fleksibilitas PLTG ini juga berpengaruh pada strategi pemeliharaan, karena turbin gas cenderung mengalami siklus start-stop yang lebih sering, temperatur operasi tinggi, serta kondisi beban yang fluktuatif. Oleh karena itu, kegiatan overhaul periodik dan manajemen tenaga kerja pemeliharaan menjadi faktor penting dalam menjaga keandalan dan performa unit PLTG.

2.2.2. Pemeliharaan Turbine Gas

Berdasarkan manual book pemeliharaan steam turbine MHI701F3 di klasifikasikan menjadi 2 kategori yaitu pemeliharaan rutin (*preventive maintenance*) dan *overhaul inspection (periodical maintenance)*.

2.2.2.1. Preventive maintenance

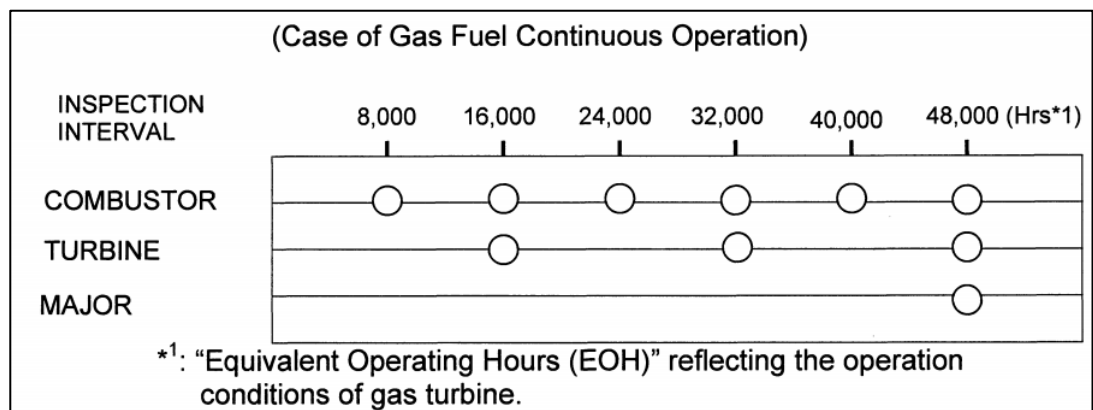
Secara umum, aktivitas pemeliharaan yang diperlukan akan ditentukan oleh hasil analisis atau investigasi parameter operasi yang akan diamati setiap hari atau selama periode waktu tertentu untuk analisis trending. Parameter ini mencakup pemantauan suhu, vibrasi, dan penurunan kinerja peralatan operasi

2.2.2.2. Periodical overhaul inspection

Overhaul inspection diclasifikasikan menjadi 3 kategori berdasarkan scope pekerjaannya yaitu:

1. *Major overhaul inspection*
2. *Turbine overhaul inspection*
3. *Combustor overhaul inspection*

Untuk menjaga ketersediaan pembangkit secara keseluruhan, turbin gas (GT) dan turbine uap (ST) melakukan pekerjaan *overhaul* pada waktu yang bersamaan. Adapun interval pemeliharaan *periodical inspection* sebagai berikut.



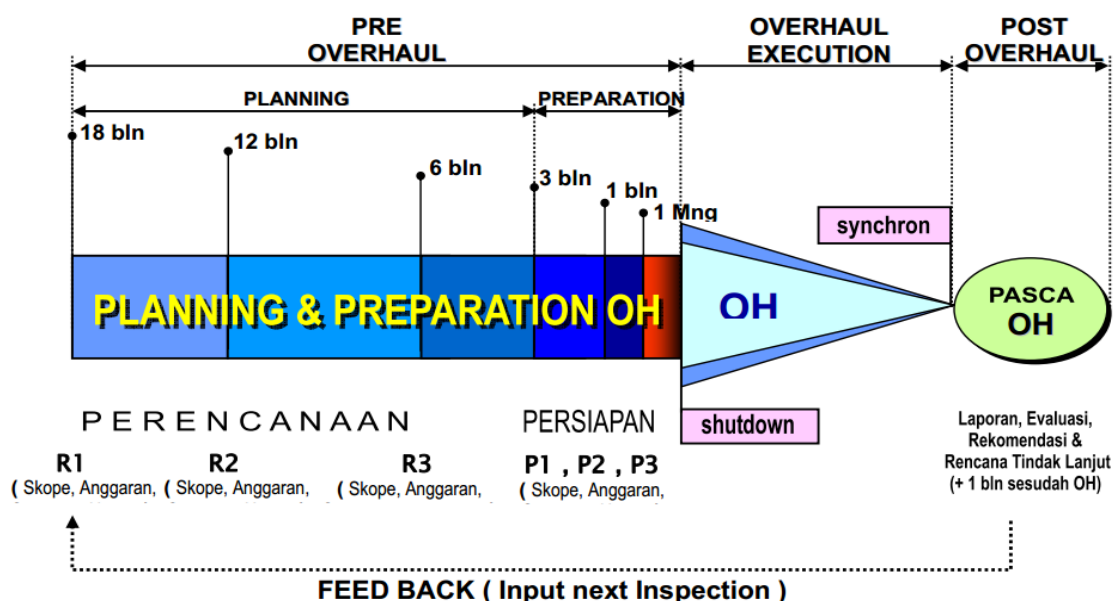
Gambar 2.2. *Intervals of periodical inspection*

INSPECTION	PROCEDURE	COMPONENTS REQUIRING INSPECTION
Combustor Inspection	Disassembly of Combustor Section	- Visual Inspection & NDT*¹ of Combustor Baskets, Transition Pieces and Fuel Nozzles - Visual Inspection and Spark Test of Igniters and Function Test of Flame Detectors - Visual Inspection of Turbine Blades Row 1 and Row 4 and Turbine Vanes Row 1 and Row 4 - Visual Inspection of Compressor IGV, Blades Row 1 and Diaphragm Last Row & OGV
Turbine Inspection	Removal of Turbine Cylinder Cover	- Visual Inspection & NDT*¹ of Turbine Blades, Vanes and Seals - Visual Inspection of Compressor IGV, Blades Row 1 and Diaphragm Last Row & OGV - Combustor Inspection is carried out at the same time.
Major Inspection	Removal of All of Turbine and Compressor Cylinder Covers and Removal of G/T Rotor	Visual Inspection & NDT*² of all Components Inspection of Auxiliary Systems, Control Systems and Instruments must be carried out during the inspection by OWNER
NOTE NDT* ¹ : Non Destructive Test (Penetrant Test) NDT* ² : Non Destructive Test (Penetrant Test, Magnet Particle Test and Ultrasonic Test)		

Gambar 2.3. *Summary of gas turbine inspection*

2.2.3. Proses Manajemen *Overhaul*

Manajemen *overhaul* adalah serangkaian proses sinergi dan berkesinambungan dari kegiatan (aktivitas utama) yang digambarkan dalam frame outage management berikut:



Gambar 2.4. *Fame outage management*

2.2.3.1. *Pre Overhaul* (perencanaan)

Proses perencanaan dan persiapan yang dilakukan pada *frame outage* dilakukan 18 bulan sebelum *overhaul execution* yang terdiri dari perencanaan R1, R2 dan R3 yang dilakukan pada 18 sampai 6 bulan sebelum dimulainya *overhaul execution* dengan hasil perencanaan meliputi penetapan scope, menetapkan form monitoring pengadaan untuk spare parts spesifik, rehabilitasi dan jasa (untuk delivery time 3 – 6 bulan)

Proses persiapan dilakukan 3 bulan sebelum dimulainya *overhaul execution* yang terdiri dari persiapan P1, P2 dan P3 yang dilakukan setidaknya 3 sampai 1 minggu sebelum *overhaul execution* dengan hasil persiapan meliputi *review scope overhaul*, kesiapan tim *overhaul*, tools, saranan, spare parts, consummable material, jasa. Hasil dari pembahasan pada step persiapan difokuskan juga pada mekanisme koordinasi dan komunikasi selama pelaksanaan *overhaul*, serta melakukan performance test sebelum *overhaul* setidaknya 2 minggu sebelum unit shutdown.

2.2.3.2. *Overhaul Excecution* (pelaksanaan)

Proses pelaksanaan *overhaul* meliputi beberapa kegiatan diantaranya meliputi :

- a. Melakukan kegiatan *overhaul* saat *shutdown* unit
- b. Melakukan kegiatan *overhaul* saat periode *disassembly*
- c. Melakukan kegiatan *overhaul* saat periode inspeksi
- d. Melakukan kegiatan *overhaul* saat periode *assembly*
- e. Melakukan pengujian/test peralatan
- f. Melakukan kegiatan *start-up* dan *commisioning*

2.2.3.3. *Post Overhaul* (pengendalian dan evaluasi) program pemeliharaan.

Proses pengendalian dan evaluasi *overhaul* meliputi beberapa kegiatan diantaranya meliputi:

- a. Melakukan presentasi dan laporan hasil pekerjaan *overhaul*
- b. Evaluasi dan rekomendasi hasil pekerjaan *overhaul*
- c. Rencana tindak lanjut untuk *overhaul* berikutnya

2.2.4. Manajemen Pemeliharaan Pembangkit Listrik (*Power Plant Maintenance*)

Manajemen pemeliharaan merupakan kombinasi dari semua tindakan teknis, administratif, dan manajerial selama siklus hidup suatu item yang dimaksudkan untuk menjaganya, atau mengembalikannya ke, keadaan di mana ia dapat melakukan fungsi yang diperlukan (Higgins & Mobley, 2002). Dalam operasional pembangkit, manajemen pemeliharaan bertujuan untuk mengoptimalkan biaya produksi dengan tetap menjaga keandalan sistem pada level tertinggi.

2.2.4.1 *Pemeliharaan Periodik (Overhaul)*

Overhaul adalah bentuk pemeliharaan pencegahan (preventive maintenance) skala besar yang dilakukan pada interval waktu tertentu. Pada unit *Gas turbine* MHI 701F3/F4, Major Inspection (MI) merupakan level pemeliharaan tertinggi yang mencakup pembongkaran total unit untuk inspeksi komponen hot-gas path, kompresor, dan turbin. Ketepatan waktu dalam MI sangat krusial karena setiap hari keterlambatan berimplikasi pada opportunity loss produksi listrik yang sangat besar (Duffuaa et al., 2012).

2.2.4.2 Faktor Keandalan dan Ketersediaan (*Reliability & Availability*)

Pemeliharaan yang dilakukan bertujuan untuk meningkatkan *Equivalent Availability Factor* (EAF) dan menurunkan *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR). Perencanaan *manpower* yang tidak optimal dapat menyebabkan pengerjaan yang terburu-buru, meningkatkan risiko kegagalan komponen setelah unit sinkron kembali.

2.2.5 Manajemen Sumber Daya Manusia dalam Proyek Teknik

Menurut PMBOK Guide (2021), manajemen sumber daya manusia proyek mencakup proses yang mengatur, mengelola, dan memimpin tim proyek. Dalam proyek pemeliharaan pembangkit, tantangan utama adalah fluktuasi kebutuhan tenaga kerja yang tidak merata di sepanjang durasi proyek (50 hari).

Penggunaan tenaga kerja kontrak dalam pemeliharaan bertujuan untuk memberikan fleksibilitas organisasi. Namun, hal ini menimbulkan tantangan pada standarisasi kualitas. Kesiapan kompetensi tenaga TBK harus dipantau agar tidak menurunkan efisiensi kerja total tim (E).

2.2.6. Analisis Beban Kerja (*Workload Analysis - WLA*)

2.2.6.1 Definisi dan Konsep Beban Kerja

Analisis Beban Kerja (WLA) adalah sebuah teknik manajemen yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh informasi mengenai tingkat efektivitas dan efisiensi kerja organisasi berdasarkan volume pekerjaan. Menurut Komaruddin (2014), beban kerja merupakan himpunan aktivitas yang harus diselesaikan oleh suatu unit organisasi atau pemegang jabatan dalam jangka waktu tertentu.

Dalam proyek pemeliharaan Gas Turbine, WLA digunakan untuk mentransformasikan Work Breakdown Structure (WBS) menjadi kebutuhan jam-orang (man-hours). Tantangan utama dalam pemeliharaan MI (Major Inspection) adalah beban kerja yang tidak konstan, di mana terdapat fase kritis yang membutuhkan konsentrasi tenaga kerja yang sangat tinggi dalam durasi yang singkat.

2.2.6.2 Metode Full Time Equivalent (FTE)

Metode FTE adalah salah satu pendekatan WLA yang paling sering digunakan dalam industri untuk menentukan jumlah staf yang dibutuhkan. FTE menghitung rasio antara total beban kerja terhadap waktu kerja efektif yang tersedia. Nilai FTE dihitung dengan rumus:

$$FTE = \frac{\text{Total Jam Kerja untuk menyelesaikan tugas}}{\text{Waktu Kerja Efektif per Orang}}$$

Menurut Keputusan Menteri Pendayagunaan Aparatur Negara (Kepmenpan), standar waktu kerja efektif biasanya dihitung setelah dikurangi waktu luang (allowance) sekitar 20-30% dari total jam kerja formal (Sari & Rahmana, 2019).

2.2.7. Studi Waktu dan Gerak (*Time and Motion Study*)

2.2.7.1. Pengukuran Kerja (*Work Measurement*)

Studi waktu adalah aktivitas untuk menentukan waktu yang dibutuhkan oleh seorang operator yang terlatih dan memiliki kualifikasi rata-rata untuk menyelesaikan suatu pekerjaan spesifik pada kecepatan kerja yang normal (Groover, 2020). Dalam konteks pemeliharaan turbin MHI 701F, pengukuran dilakukan pada aktivitas teknis seperti pembongkaran baut casing atau inspeksi sudu.

2.2.7.2 Penentuan Waktu Siklus (W_s)

Waktu siklus adalah waktu rata-rata yang diperoleh dari hasil pengamatan langsung di lapangan secara berulang. Untuk memperoleh data yang representatif secara statistik, dilakukan uji kecukupan data menggunakan rumus berikut:

$$n' = \left(\frac{\frac{k}{s} \sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}{\sum x_i} \right)^2$$

Keterangan :

n' = Jumlah pengamatan minimal yang dibutuhkan.

k = Tingkat kepercayaan (misal 95% maka $k=2$).

s = Derajat ketelitian (misal 5% atau 0,05).

x_i = Data waktu hasil pengamatan.

2.2.7.3. Faktor Penyesuaian (*Rating Factor – p*)

Faktor penyesuaian digunakan untuk menormalkan waktu kerja jika operator bekerja di atas atau di bawah kecepatan normal. Salah satu metode yang paling komprehensif adalah Sistem *Westinghouse*, yang memberikan bobot pada empat faktor (Niebel & Freivalds, 2013):

1. *Skill* (Keterampilan): Keahlian teknis dalam menangani komponen presisi turbin.
2. *Effort* (Usaha): Kesungguhan kerja di lapangan.
3. *Condition* (Kondisi): Lingkungan kerja (suhu area turbin yang panas).
4. *Consistency* (Konsistensi): Stabilitas waktu kerja antar siklus.

Waktu Normal (W_n) dihitung dengan :

$$W_n = W_s \times p$$

2.2.7.4. Faktor Kelonggaran (*Allowance – l*)

Kelonggaran diberikan karena manusia tidak dapat bekerja secara terus-menerus selama delapan jam tanpa jeda. Barnes (1980) membagi kelonggaran menjadi tiga kategori:

- Kebutuhan Pribadi (*Personal Needs*): Minum, ke toilet.
- Menghilangkan Kelelahan (*Fatigue*): Mengingat MI dilakukan di area pembangkit dengan temperatur tinggi, faktor kelelahan fisik sangat signifikan.
- Hambatan Tak Terhindarkan (*Unavoidable Delay*): Menunggu ketersediaan crane, koordinasi ijin kerja (*Permit to Work*), atau *safety briefing*.

2.2.8. *Work Breakdown Structure (WBS)* dalam Pemeliharaan

WBS adalah dekomposisi hierarkis dari total ruang lingkup pekerjaan yang akan dilaksanakan oleh tim proyek. Dalam MI Plus GT 4.2, WBS membagi pekerjaan besar (misalnya: *disassembly*) menjadi sub-aktivitas yang dapat diukur (misalnya: *opening upper casing*). WBS menjadi dasar dalam perhitungan total *manhours* yang dibutuhkan (Project Management Institute, 2021).

WBS merupakan salah satu perangkat utama dalam manajemen proyek yang digunakan untuk memecah ruang lingkup pekerjaan menjadi struktur hierarkis yang lebih rinci. Project Management Institute menjelaskan bahwa WBS Adalah “*a hierarchical decomposition of the total scope of work to be carried out by the project team to accomplish the project objectives and create the required deliverables.*” (PMI, 2017). Definisi tersebut menegaskan bahwa WBS berfungsi sebagai kerangka pemetaan ruang lingkup pekerjaan sehingga aktivitas proyek dapat dikendalikan melalui paket-paket kerja (*work packages*) yang jelas, terukur, dan dapat ditugaskan kepada unit pelaksana tertentu.

2.2.8.1. Fungsi WBS dalam Perencanaan Pemeliharaan

Pada pekerjaan pemeliharaan periodik, WBS berperan penting sebagai dasar penyusunan jadwal dan estimasi kebutuhan sumber daya. WBS memungkinkan pekerjaan pemeliharaan dipecah menjadi aktivitas teknis yang lebih spesifik, seperti *dismantling, inspection, repair, reassembly*, hingga *testing*. Dengan struktur tersebut, setiap aktivitas dapat dihubungkan dengan durasi, kebutuhan tenaga kerja, kebutuhan material, serta keterkaitan antar pekerjaan. Dalam penelitian tentang pemeliharaan, WBS terbukti meningkatkan keterukuran pekerjaan. Jones dan Gunawan (2021) menyatakan bahwa: “*the implementation of WBS in maintenance planning improves clarity of task segmentation and enhances the monitoring of execution performance.*” (Jones & Gunawan, 2021). Pernyataan tersebut menunjukkan bahwa WBS meningkatkan kejelasan segmentasi tugas serta mempermudah proses monitoring pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan.

2.2.8.2. WBS sebagai Dasar Pengendalian Kinerja dan Pengukuran Produktivitas

Selain sebagai alat perencanaan, WBS juga berfungsi sebagai basis pengendalian kinerja proyek. Dengan WBS, proses pemantauan progres dapat dilakukan secara lebih akurat karena indikator kemajuan pekerjaan ditentukan berdasarkan penyelesaian paket kerja. Hal ini sangat relevan pada proyek MI Plus *gas turbine* yang memiliki banyak aktivitas paralel, area kerja terbatas, serta tingkat risiko keselamatan yang tinggi. Kurniawan dan Putri (2020) menekankan bahwa pendekatan WBS memberikan kontribusi terhadap pengendalian kualitas dan pengukuran performa: “*The WBS-based approach allows for a more comprehensive breakdown of maintenance tasks, enabling better performance measurement and*

quality control.” (Kurniawan & Putri, 2020). Dengan demikian, WBS berfungsi sebagai fondasi dalam pengukuran produktivitas tenaga kerja, karena setiap aktivitas telah memiliki definisi output dan target yang dapat dievaluasi.

2.2.8.3. Relevansi WBS terhadap Optimasi *Manpower* dan *Workload Analysis*

Dalam penelitian ini, WBS menjadi basis utama untuk menghitung kebutuhan *manhourss* total, melakukan WLA, serta mengevaluasi distribusi *manpower* antar divisi. WBS yang disusun dalam MS-Project menghasilkan akumulasi *manhourss* yang terukur dan dapat digunakan sebagai input untuk analisis kebutuhan tenaga kerja optimal. Selain itu, WBS dapat dikombinasikan dengan metode manajemen lainnya. Arifin et al. (2022) menjelaskan bahwa: “*WBS provides a systematic framework that can be integrated with technical tools such as BIM to enhance maintenance planning and execution, especially for complex assets.*” (Arifin et al., 2022). Pernyataan ini menguatkan bahwa WBS merupakan kerangka sistematis yang fleksibel dan dapat diintegrasikan dengan pendekatan teknis lainnya, khususnya pada pemeliharaan aset kompleks seperti *gas turbine*.

2.2.9. Teori Ergonomi Lingkungan Kerja

Ergonomi merupakan ilmu yang mempelajari interaksi antara manusia dengan elemen sistem kerja, dengan tujuan mengoptimalkan kinerja sekaligus menjaga kesehatan dan keselamatan pekerja. Dalam konteks industri pembangkit listrik, khususnya pada area turbin gas, faktor lingkungan kerja seperti suhu tinggi, radiasi panas, kebisingan, dan getaran memiliki pengaruh signifikan terhadap performa teknisi.

Menurut Robert S. Bridger dalam *Introduction to Ergonomics* (2017), kondisi lingkungan kerja yang ekstrem dapat meningkatkan beban fisiologis pekerja, yang pada akhirnya menurunkan kapasitas kerja efektif. Beban fisiologis ini perlu diperhitungkan dalam perencanaan waktu kerja, allowance, serta estimasi produktivitas tenaga kerja.

1. Beban Panas (Heat Stress)

Area turbin gas memiliki temperatur lingkungan yang relatif tinggi akibat radiasi panas dari casing turbin, exhaust system, dan komponen pembakaran. Heat stress terjadi ketika tubuh tidak mampu membuang panas secara efektif, sehingga suhu inti tubuh meningkat.

Secara fisiologis, heat stress menyebabkan:

- Peningkatan denyut jantung
- Peningkatan suhu tubuh inti
- Penurunan konsentrasi
- Dehidrasi
- Percepatan kelelahan

Bridger (2017) menjelaskan bahwa peningkatan denyut jantung akibat beban panas berbanding lurus dengan peningkatan konsumsi oksigen dan energi metabolik. Dalam kondisi ini, pekerja akan mengalami penurunan kapasitas kerja efektif, sehingga diperlukan waktu istirahat tambahan (rest allowance).

Secara kuantitatif, allowance pada lingkungan panas biasanya lebih tinggi dibandingkan pekerjaan administratif. Jika allowance administratif berkisar 5–10%, maka pada lingkungan panas dan berat dapat meningkat hingga 15–30% tergantung tingkat paparan panas.

2. Kebisingan (*Noise Exposure*)

Area turbin gas sering memiliki tingkat kebisingan di atas 85 dB, terutama saat unit beroperasi. Paparan kebisingan tinggi dalam jangka panjang dapat menyebabkan:

- Gangguan pendengaran (Noise Induced Hearing Loss/NIHL)
- Peningkatan stres kerja
- Penurunan konsentrasi
- Risiko kesalahan kerja meningkat

Batas paparan kebisingan 85 dB selama 8 jam kerja merupakan standar yang umum digunakan dalam regulasi K3 industri. Pada level kebisingan yang lebih tinggi, durasi paparan harus dikurangi atau diwajibkan penggunaan alat pelindung diri (ear protection).

Dalam perspektif ergonomi, kebisingan tidak hanya berdampak pada kesehatan, tetapi juga pada produktivitas dan akurasi kerja, khususnya pada pekerjaan presisi seperti pengukuran komponen turbin.

3. Radiasi Panas dan Lingkungan Fisik

Radiasi panas dari permukaan turbin dan pipa exhaust meningkatkan beban termal lingkungan kerja. Indikator yang umum digunakan untuk menilai kondisi ini adalah *WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)*. Nilai WBGT yang tinggi menunjukkan risiko heat stress yang lebih besar. Lingkungan dengan:

- Suhu tinggi
- Kelembapan tinggi
- Ventilasi terbatas

akan meningkatkan kebutuhan allowance waktu istirahat dan mempengaruhi perencanaan jumlah tenaga kerja dalam proyek overhaul.

4. Hubungan Ergonomi dengan Perhitungan *Standard Time* dan *Allowance*

Dalam studi waktu kerja (*time study*), *allowance* merupakan faktor koreksi yang ditambahkan pada waktu normal untuk menghasilkan waktu standar.

Secara matematis:

$$W_s = W_n \times \frac{100\%}{100\% - Allowance}$$

Pada pekerjaan overhaul turbin gas yang berada di lingkungan panas dan bising, nilai allowance harus mencakup:

- *Personal allowance*
- *Fatigue allowance*
- *Environmental allowance*

Menurut Bridger (2017), pekerjaan fisik dalam lingkungan panas membutuhkan kompensasi allowance yang lebih tinggi dibandingkan pekerjaan kantor. Hal ini penting untuk mencegah kelelahan berlebih yang dapat meningkatkan risiko kecelakaan kerja.

5. Implikasi terhadap Perencanaan *Manpower Overhaul* Turbin Gas

Dalam konteks penelitian perencanaan tenaga kerja overhaul turbin gas:

- Kondisi lingkungan kerja ekstrem meningkatkan fatigue rate.

- Nilai allowance yang lebih besar menyebabkan waktu standar meningkat.
- Total manhours proyek menjadi lebih besar.
- Kebutuhan manpower optimal harus mempertimbangkan faktor ergonomi lingkungan.

Dengan demikian, faktor ergonomi lingkungan kerja bukan hanya isu keselamatan, tetapi juga variabel penting dalam model perencanaan tenaga kerja berbasis *workload dan manhours*.

2.2.10. Penentuan Jumlah Tenaga Kerja Optimal

Penentuan jumlah tenaga kerja yang optimal merupakan tahapan kritis dalam manajemen proyek pemeliharaan *Major Inspection*. Tujuan utama dari perhitungan ini adalah untuk menyeimbangkan antara ketersediaan sumber daya dengan tuntutan jadwal (deadline) agar tidak terjadi *manpower shortage* yang menyebabkan keterlambatan, atau over-manning yang menyebabkan inefisiensi biaya dan kepadatan area kerja (*crowding*).

2.2.10.1 Formulasi Perhitungan Tenaga Kerja

Secara matematis, kebutuhan personel dihitung dengan mengonversi total beban kerja dalam satuan jam-orang (*man-hours*) ke dalam satuan jumlah orang (*manpower*) dengan mempertimbangkan batasan waktu dan efisiensi. Formulasi yang digunakan merujuk pada prinsip manajemen operasional dan akuntansi biaya sebagai berikut:

$$M = \frac{\sum W_b}{T \times E}$$

Keterangan :

- M (*Manpower*): Merupakan jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu paket pekerjaan atau fase pemeliharaan tertentu. Hasil perhitungan ini biasanya dibulatkan ke atas (*round up*) untuk memastikan ketersediaan personel yang mencukupi (Hansen & Mowen, 2013).

- ΣW_b (Total *Man-Hours*): Jumlah total waktu baku yang telah dihitung melalui *Time Motion Study* untuk seluruh aktivitas dalam satu periode. Variabel ini mencerminkan volume pekerjaan yang harus diselesaikan.
- T (*Duration/Time Available*): Total waktu yang tersedia sesuai dengan *master schedule* atau jalur kritis (*critical path*) proyek. Dalam pemeliharaan turbin gas, T biasanya ditentukan berdasarkan target durasi outage (misalnya 50 hari kerja).
- E (*Efficiency*): Faktor efisiensi kerja yang menggambarkan rasio antara waktu produktif dengan total waktu yang dibayarkan. Hansen dan Mowen (2013) menyatakan bahwa dalam lingkungan industri, nilai efisiensi kerja umumnya berada pada rentang 0.8 hingga 0.9. Faktor ini mengakomodasi adanya waktu yang hilang secara alami yang tidak dapat dihindari sepenuhnya dalam manajemen organisasi.

2.2.10.2 Faktor Efisiensi dalam Pemeliharaan Pembangkit

Penggunaan nilai efisiensi (E) sebesar 0.8 (80%) hingga 0.9 (90%) sangat relevan dalam pekerjaan pemeliharaan gas turbine. Hal ini disebabkan oleh beberapa kondisi lapangan yang mempengaruhi produktivitas, antara lain:

- Koordinasi Teknis: Waktu yang dibutuhkan untuk serah terima pekerjaan (*job handover*) antar shift.
- Persiapan Alat: Waktu untuk mobilisasi tools khusus dari gudang ke area turbin.
- Kepatuhan K3: Prosedur keselamatan seperti *safety induction* harian dan pengecekan gas berbahaya yang wajib dilakukan sebelum pekerjaan dimulai.

2.2.10.3 Dampak Optimasi Tenaga Kerja

Menurut Heizer dan Render (2017), penentuan jumlah tenaga kerja yang akurat berdampak langsung pada dua aspek utama:

1. **Aspek Ekonomi:** Meminimalkan biaya upah lembur (*overtime*) dan biaya mobilisasi tenaga kerja kontrak (TBK).
2. **Aspek Teknis:** Memastikan beban kerja per individu tetap berada dalam batas ergonomis, sehingga menurunkan risiko *human error* pada pekerjaan presisi seperti pengukuran *clearance* sudu turbin.

2.2.11. Konsep *Resource Leveling*

Dalam manajemen proyek, pengelolaan sumber daya menjadi salah satu faktor penting yang menentukan keberhasilan pelaksanaan proyek. Salah satu teknik yang digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya adalah *resource leveling*, yaitu proses penyesuaian jadwal proyek untuk mengatasi keterbatasan atau konflik penggunaan sumber daya.

Menurut Project Management Institute, *resource leveling* merupakan teknik penjadwalan yang digunakan ketika sumber daya memiliki keterbatasan ketersediaan. Penyesuaian jadwal dilakukan dengan menggeser aktivitas proyek sehingga kebutuhan sumber daya tidak melebihi kapasitas yang tersedia. Proses ini dapat mengubah jalur kritis dan memperpanjang durasi proyek (*A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (PMBOK Guide), 2021).

Secara konseptual, *resource leveling* bertujuan untuk meminimalkan fluktuasi penggunaan sumber daya selama proyek berlangsung. Dengan distribusi beban kerja yang lebih merata, proyek dapat berjalan lebih stabil dan efisien. Teknik ini biasanya diterapkan pada tahap perencanaan dan pengendalian jadwal proyek, khususnya ketika beberapa aktivitas membutuhkan sumber daya yang sama dalam waktu bersamaan.

Menurut Harold Kerzner, *resource leveling* merupakan bagian dari proses optimasi penjadwalan proyek yang bertujuan untuk menghindari kondisi *overallocation* dan *underutilization* sumber daya. Penjadwalan ulang dilakukan dengan memanfaatkan float pada aktivitas non-kritis tanpa mengorbankan tujuan proyek (*Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 2017).

Beberapa pendekatan yang umum digunakan dalam *resource leveling* meliputi:

- penundaan aktivitas non-kritis,
- pengaturan ulang urutan pekerjaan,
- penyesuaian alokasi tenaga kerja atau peralatan,
- pemanfaatan waktu senggang (float) dalam jaringan kerja proyek.

Selain itu, *resource leveling* sering dikaitkan dengan metode penjadwalan proyek seperti *Critical Path Method* (CPM) dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) karena kedua metode tersebut menyediakan informasi

ketergantungan aktivitas dan waktu kelonggaran yang diperlukan untuk melakukan penyesuaian sumber daya.

Perlu dibedakan antara *resource leveling* dan *resource smoothing*. *Resource leveling* berfokus pada keterbatasan sumber daya dan dapat mengubah durasi proyek, sedangkan *resource smoothing* mempertahankan batas waktu proyek dan hanya menyesuaikan distribusi sumber daya dalam batas kelonggaran aktivitas.

Dengan demikian, *resource leveling* merupakan teknik penting dalam manajemen proyek untuk memastikan penggunaan sumber daya yang efisien, realistis, dan sesuai dengan kapasitas yang tersedia.