

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

|   |                                      |                                                   |                                                        |                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---|--------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                      |                                                   |                                                        |                                                                                             | pemeliharaan dinamis (CBM) berdasarkan data aktual, bukan interval waktu statis.                                                                                                                                                                                     |
| 6 | <b>Koerniawan &amp; Wahyu (2024)</b> | 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. | <p><b>Kekurangan:</b><br/>Minimnya data empiris lapangan dalam literatur yang ada.</p> <p><b>Posisi Tesis:</b><br/>Tesis ini mengisi celah dengan menyajikan studi kasus empiris menggunakan data operasional riil dan laporan BSI dari armada TM2500 PLN Batam.</p> |
| 7 | <b>Aust et al. (2021)</b>            | Deteksi kerusakan <i>blade</i> turbin menggunakan | Pengolahan citra digital dan <i>Machine Learning</i> . | Efisiensi dan akurasi analisis visual meningkat signifikan dalam                            | <p><b>Kekurangan:</b><br/>Fokus penelitian hanya pada teknis deteksi kerusakan visual.</p>                                                                                                                                                                           |

|  |  |                          |  |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--|--|--------------------------|--|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <i>image processing.</i> |  | mendeteksi cacat fisik. | <p>Tidak dikaitkan dengan strategi manajemen pemeliharaan (CBM) secara utuh maupun perhitungan dampak ekonominya.</p> <p><b>Posisi Tesis:</b><br/>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>.</p> |
|--|--|--------------------------|--|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 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**

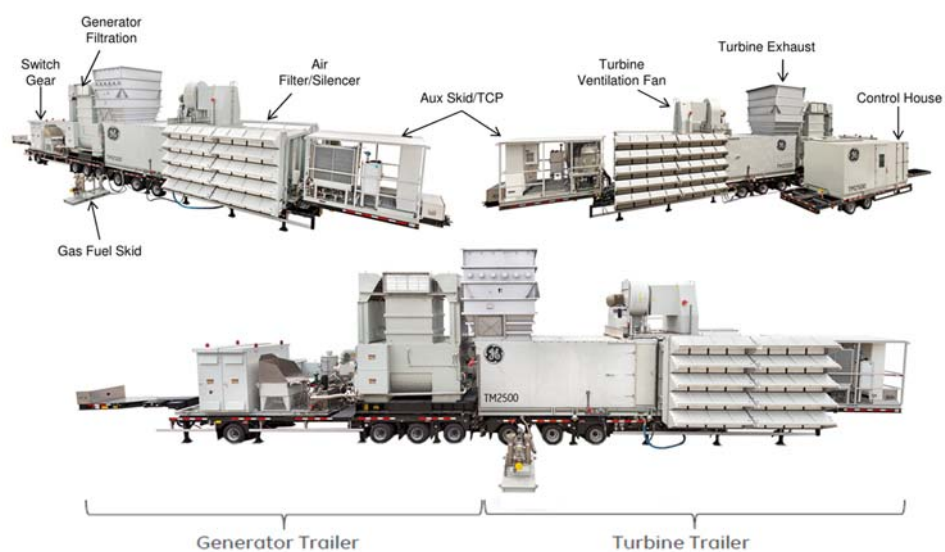
| NO. | KARAKTERISTIK               | AERO-<br>DERIVATIF       | HEAVY-<br>DUTY        |
|-----|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1   | Rasio Daya terhadap Berat   | Sangat Tinggi            | Rendah                |
| 2   | Waktu Start-up              | 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.

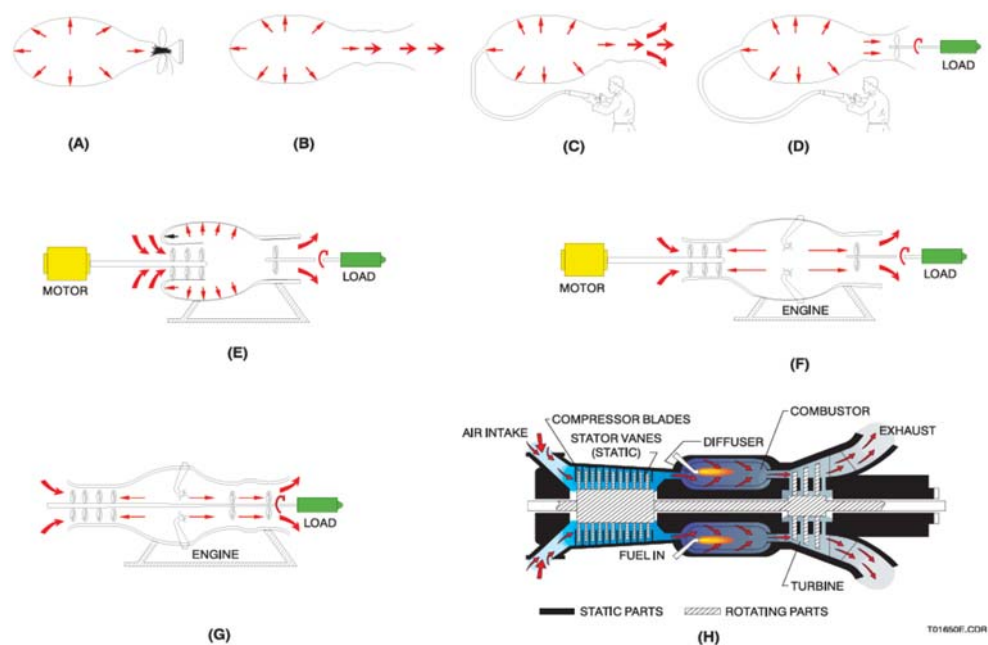


**Gambar 2.1 Konfigurasi TM2500 [21].**

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:

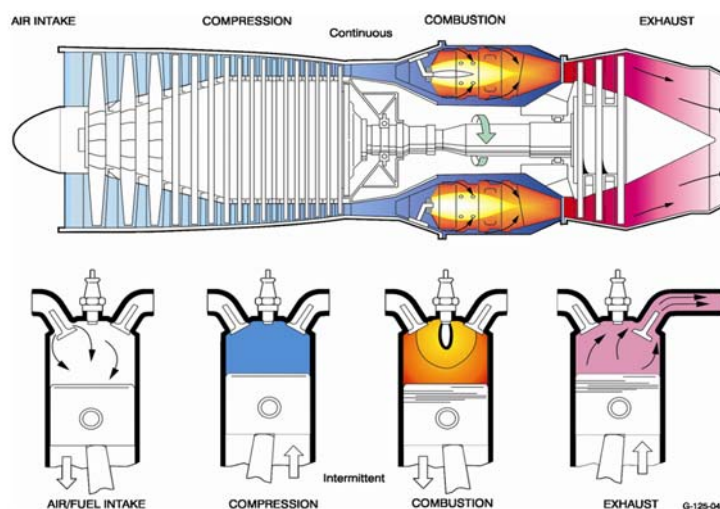
(A–D) menggambarkan analogi fluida dalam sistem tekanan, di mana pengaruh perbedaan tekanan dan arah dorongan menghasilkan vektor gaya

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].**