

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Penelitian yang dilakukan oleh (Syammary et al., 2020) mengkaji efisiensi turbin gas tipe V94.2 sebelum dan sesudah *overhaul*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi termal sebesar 3.2% setelah dilakukan overhaul komprehensif. Penelitian ini menggunakan metode analisis data performa selama 6 bulan sebelum dan 6 bulan setelah *overhaul*. Parameter yang diamati meliputi daya output, konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), dan *heat rate*. Temuan penting dari penelitian ini adalah bahwa komponen-komponen kritis seperti *blade turbin*, *nozzle guide*, dan *combustor chamber* mengalami degradasi performa yang signifikan sebelum overhaul. Setelah overhaul, parameter performa berhasil dikembalikan mendekati kondisi desain awal, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi termal secara keseluruhan.

Studi yang dilakukan oleh (Teknologi et al., 2024) pada Gas Turbine Unit 2 menunjukkan hasil yang konsisten dengan penelitian sebelumnya. Penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan performa antara kondisi normal dan pasca-overhaul dengan menggunakan metode perhitungan efisiensi berdasarkan standar ASME PTC 22. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat dari 32.5% menjadi 35.8% setelah overhaul. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh perbaikan pada sistem kompresi yang mengalami peningkatan rasio tekanan dari 12:1 menjadi 14.5:1. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi faktor-faktor lain yang memengaruhi efisiensi seperti kondisi ambient, kualitas bahan bakar, dan pola operasi.

Penelitian yang dilakukan pada PLTU Mamuju (Buana et al., 2024) memberikan perspektif yang berbeda dengan fokus pada turbin uap. Meskipun konteksnya adalah PLTU, metodologi dan prinsip analisis efisiensi yang digunakan dapat diadaptasi untuk PLTGU. Penelitian ini menemukan bahwa efisiensi turbin uap meningkat sebesar 2.8% setelah overhaul. Peningkatan terbesar terjadi pada penurunan entalpi uap keluar turbin (*exhaust steam enthalpy*) dari 2.450 kJ/kg menjadi 2.380 kJ/kg. Parameter lain seperti tekanan

uap masuk, temperatur uap masuk, dan vacuum kondensor juga mengalami perbaikan signifikan.

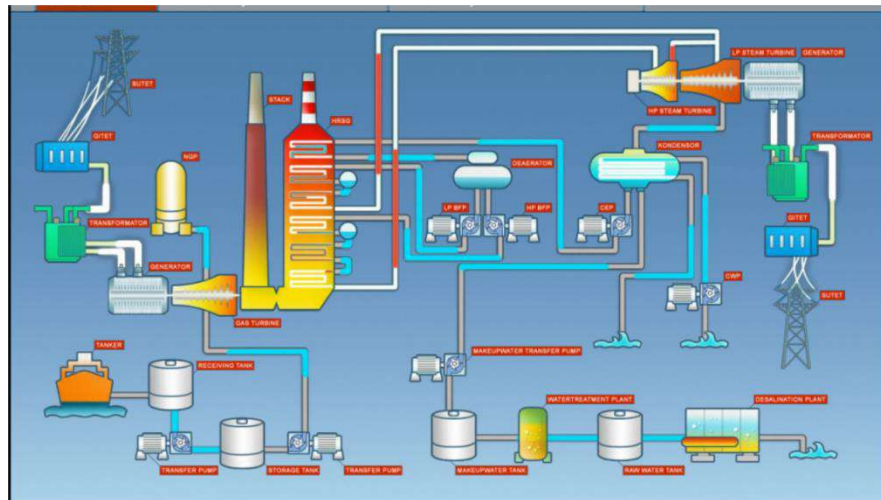
Studi komprehensif yang dilakukan oleh (Lumbantobing et al., 2025) pada PLTGU Muarakarang memberikan wawasan penting mengenai faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi termal pada siklus kombinasi. Penelitian ini menganalisis data historis selama 5 tahun untuk memahami pola degradasi performa dan dampak overhaul. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal keseluruhan PLTGU dapat meningkat hingga 4.5% setelah overhaul kedua unit (gas dan uap). Peningkatan ini lebih signifikan dibandingkan overhaul hanya pada unit gas saja yang hanya memberikan peningkatan sebesar 2.8%. Hal ini menunjukkan pentingnya sinkronisasi overhaul antara unit gas dan uap untuk mencapai efisiensi optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap atau biasa disebut PLTGU adalah gabungan antara dua pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTG umumnya menggunakan bahan bakar minyak atau gas, sedangkan PLTU menghasilkan uap tanpa perlu bahan bakar untuk memanaskan air, yang kemudian memanfaatkan uap tersebut untuk menggerakkan turbin. Maka, PLTGU disebut *combine cycle power plant*.

Pada sistem ini, panas yang dihasilkan dari gas buang pada turbin gas (PLTG) digunakan untuk menghasilkan uap melalui *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). Uap tersebut kemudian digunakan sebagai fluida kerja untuk memutar turbin uap (PLTU), sehingga menghasilkan listrik secara lebih efisien dengan memanfaatkan energi panas yang biasanya terbuang. (Martin et al., 2016)

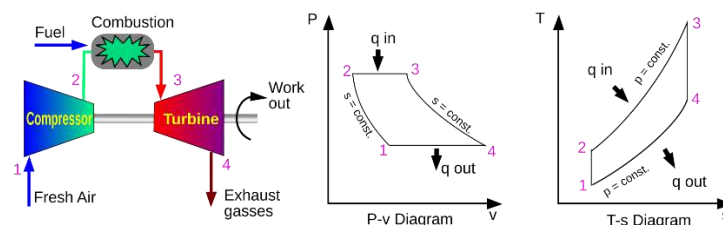


Gambar 2.1 Siklus PLTGU UP Gresik

Sumber : PT PLN Nusantara Power UP Gresik

2.2.2 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

a. Siklus *Brayton*



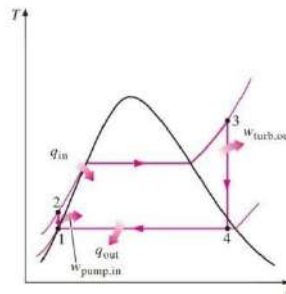
Gambar 2.2 Siklus Brayton

Sumber: id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Brayton_cycle.svg

1. Langkah 1 ke 2 : Proses kompresi isentropik, Udara dikompresi di kompresor, tekanan dan temperatur naik, entropi tetap karena proses isentropik (tidak ada perubahan entropi).
2. Langkah 2 ke 3 : Penambahan panas isobarik (ruang bakar), Udara bertekanan tinggi dipanaskan pada tekanan konstan, temperatur dan entropi meningkat karena adanya penambahan energi panas.

3. Langkah 3 ke 4 : Ekspansi isentropik di turbin, Uap panas mengalami ekspansi di turbin, tekanan dan temperatur turun, entropi tetap karena proses adiabatik isentropik.
4. Langkah 4 ke 1 : Pembuangan panas isobarik Gas bekerja keluar, pada tekanan konstan, entropi dan temperatur turun kembali ke kondisi awal siklus.

b. Siklus *Rankine*



Gambar 2.3 Siklus Rankine

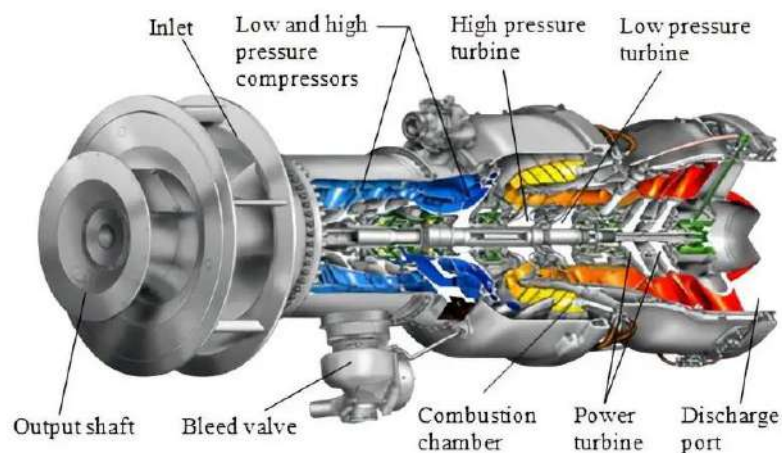
Sumber : researchgate.net

1. Langkah 1 ke 2 : fluida dipompa dari tekanan rendah ke tekanan tinggi.
2. Langkah 2 ke 3 : fluida bertekanan tinggi dipanaskan dalam boiler untuk berubah menjadi uap bertekanan tinggi, seringkali dipanaskan lebih lanjut (superheating) untuk meningkatkan efisiensi.
3. Langkah 3 ke 4 : Uap bertekanan tinggi berekspansi melalui turbin, memutar bilahnya untuk menghasilkan kerja mekanis.
4. Langkah 4 ke 1 : Uap yang telah melalui turbin masuk ke kondensor, di mana panasnya dibuang dan berubah kembali menjadi air cair.

2.2.3 Definisi Turbin Gas

Turbin gas adalah mesin yang mengubah energi panas dari pembakaran bahan bakar menjadi tenaga mekanik untuk menghasilkan listrik atau mendorong kendaraan. Prinsip kerjanya melibatkan aliran udara yang

dipanaskan, yang kemudian mendorong bilah-bilah (sudu) di dalam turbin untuk berputar. Ada dua cara utama turbin gas bekerja: impuls (udara mendorong bilah rotor langsung) dan reaksi (udara mengembang di bilah rotor, menciptakan gaya dorong saat keluar). Energi yang dihasilkan sekitar 60% digunakan untuk menjalankan kompresor sendiri, sisanya untuk generator atau mesin lain. Gas sisa pembakaran masih panas dan terbuang melalui cerobong (*exhaust*), yang bisa dimanfaatkan lebih lanjut di turbin gas (Ikhramani, 2016)



Gambar 2.4 Gas Turbin

Sumber : engineeringacademygh

2.2.4 Komponen Utama Turbin Gas

Didalam turbin gas kerjanya didukung oleh tiga komponen yaitu :

1. Kompresor

Kompresor memiliki fungsi krusial dalam menyediakan aliran udara bertekanan tinggi dengan volume yang besar, yang diperlukan untuk mendukung proses pembakaran di dalam ruang bakar. Kompresor berputar seporos dengan turbin dan generator, sehingga tenaga yang dibutuhkan untuk memutar kompresor dapat diambil

langsung dari energi turbin, sehingga secara efektif mengurangi kebutuhan daya terpisah untuk proses ini.

Kompresor aksial melakukan kompresi fluida melalui dua tahapan utama, yakni akselerasi dan difusi. Pada tahap akselerasi, fluida dikarakteristikan dengan melewati rotor yang berputar untuk meningkatkan kecepatannya, kemudian pada tahap difusi, fluida tersebut mengalami perlambatan pada sudu-sudu tetap (stator) untuk meningkatkan tekanannya. Kompresor aksial terdiri dari beberapa tingkatan (*stage*), di mana setiap tingkatan tersusun atas satu rotor dan satu stator. Selain itu, terdapat juga *inlet guide vane* yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara masuk dengan presisi menuju tingkatan pertama kompresor



Gambar 2.5 Kompresor

2. Ruang Bakar

Ruang bakar merupakan komponen vital yang bertugas untuk mencampurkan udara dengan bahan bakar dalam perbandingan yang seimbang guna memastikan pembakaran yang efisien dan stabil. Setelah pencampuran, campuran ini dinyalakan oleh pemantik sehingga terjadi proses pembakaran yang optimal. Di dalam ruang bakar terdapat sejumlah komponen pendukung seperti *diffuser duct*, *fuel nozzle*, dan *transition duct*. *Diffuser duct* berperan penting dalam mengubah aliran udara menjadi turbulen sebelum memasuki ruang bakar, yang bertujuan untuk meningkatkan homogenitas pencampuran antara udara dan bahan bakar. *Fuel nozzle* berfungsi untuk mengabutkan bahan bakar sehingga

dapat tercampur secara merata dengan udara. *Transition duct* mengarahkan gas hasil pembakaran menuju sudu-sudu turbin, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan putaran poros turbin. Fungsi utama keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas yang diperlukan dalam siklus kerja turbin. (Boangmanalu, O. T., & Nurhasanah, 2024)



Gambar 2.6 Ruang Bakar

3. Turbin

Bagian turbin berfungsi sebagai tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang difungsikan sebagai penggerak kompresor aksial serta perlengkapan tambahan lainnya. Sekitar 60% dari total energi yang dihasilkan digunakan untuk memutar kompresor itu sendiri, sementara sisanya digunakan untuk keperluan kerja lainnya.

Ada dua langkah utama dalam turbin gas yang mengubah gradien termal dan tekanan menjadi energi mekanik. Gas panas yang keluar dari nozel mengalami ekspansi dan mengerjakan kerja pada sudu-sudu turbin. Sekitar dua pertiga dari energi siklus ini digunakan untuk menggerakkan kompresor, sedangkan satu pertiga sisanya dimanfaatkan untuk output daya yang berguna dalam memutar poros penggerak beban. (Wibowo, 2022)

Langkah pertama melibatkan pemaparan turbin pada suhu yang sangat tinggi, hingga 1204°C atau 2200°F, bersama dengan udara dan kotoran bahan bakar, sehingga sangat rentan terhadap korosi. Oleh karena itu, material komponen turbin harus menggunakan paduan khusus (alloys) yang dilapisi dengan proses pelapisan (coating) berkualitas tinggi untuk melindungi material dari kerusakan akibat korosi dan memaksimalkan umur pakai komponen tersebut.



Gambar 2.7 Turbin

2.2.5 Bagian Pendukung Turbin Gas

1. *Start system* berfungsi untuk memulai operasi turbin gas.
2. *Fuel system* berfungsi sebagai Sistem bahan bakar memanfaatkan natural gas yang masuk ke ruang bakar melalui injector dengan parameter tekanan dan suhu yang sesuai dengan standar kerja turbin.
3. *Air system* yaitu udara yang dikompresi tidak sepenuhnya dialirkan ke ruang bakar Udara juga digunakan untuk proses pembakaran serta sistem pendinginan (cooling system) guna menjaga suhu komponen turbin tetap dalam batas aman.
4. *Lube Oil System* atau Sistem pelumasan yang bertugas memberikan pelumas secara kontinu untuk mengurangi gesekan dan aus pada komponen mekanik, terutama bearing dan gear.

Sistem kontrol berfungsi untuk memantau dan mengendalikan seluruh operasi turbin gas, sehingga kinerja mesin dapat terjaga dengan optimal dan kondisi komponen dapat dipantau secara real-time.

2.2.6 Maintenance Turbin Gas

Maintenance pada turbin gas adalah serangkaian kegiatan rutin atau berkala untuk memastikan kinerja, keamanan, dan umur pakai turbin gas yang optimal. Turbin gas beroperasi pada suhu tinggi hingga 1.500°C dan tekanan tinggi, sehingga rentan terhadap keausan, korosi, dan kegagalan. Perawatan ini penting untuk mencegah *downtime*, meningkatkan efisiensi, dan mengurangi biaya operasional, perawatan yang dilakukan diantara lain yaitu:

1. Preventive Maintenance

perawatan yang terjadwal dalam interval waktu tertentu, berdasarkan *calendar desk* atau *run-time hours* dari peralatan. Pada waktu tersebut dilakukan perbaikan atau penggantian komponen yang rusak sebelum terjadi masalah.

2. Corrective Maintenance

proses perbaikan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan atau kegagalan pada peralatan atau sistem. Pendekatan ini melibatkan diagnosis masalah, penggantian bagian yang rusak, dan pemulihan fungsi operasional, sering kali dilakukan secara reaktif untuk mengembalikan kondisi normal.

3. Predictive Maintenance

mengamati peralatan secara periodik. Ketika terdeteksi trend yang berbahaya, komponen yang bermasalah pada peralatan diidentifikasi dan dijadwalkan untuk perbaikan. Peralatan tersebut akan dimatikan pada saat tersebut apabila masalah yang terjadi sangat darurat dan komponen yang rusak akan diganti.

4. *Breakdown Maintenance*

mengoperasikan peralatan sampai terjadi kerusakan dan hanya memperbaiki atau mengganti komponen yang rusak. Kekurangan perawatan jenis ini adalah merupakan jenis manajemen yang tidak terencana.

2.2.7 Tiga Jenis *Maintenance* Utama Pada Turbin Gas

1. *Combuster Inspection*

Merupakan kegiatan pemeliharaan preventif pada turbin gas yang fokus pada pemeriksaan dan perbaikan komponen-komponen di dalam ruang bakar (*combustor chamber*). Proses ini melibatkan pembongkaran, pemeriksaan visual, pembersihan, dan perbaikan elemen-elemen kunci seperti *fuel nozzle*, *combustor basket*, *transition pieces*, serta komponen pendukung lainnya yang terletak di dalam combustor chamber. (Bălănescu & Homutescu, 2019)

2. *Major Inspection*

Merupakan inspeksi menyeluruh yang dilakukan pada interval waktu yang lebih panjang, biasanya setiap beberapa tahun sekali. Ini melibatkan pembongkaran sebagian besar turbin gas untuk memeriksa, perbaikan atau penggantian komponen besar yang sudah rusak (Akhir et al., 2024)

3. *Turbine Inspection*

Merupakan pemeliharaan yang mencakup pemeriksaan dan perbaikan bagian dalam turbin gas yang terpapar gas panas bertekanan tinggi, termasuk sudu-sudu turbin (*blade*), rotor, *diaphragm*, *seal labirin*, serta *bearing* aksial dan *journal* yang bertujuan untuk mendeteksi kerusakan, keausan, dan deformasi yang mungkin tiba-tiba terjadi (Anzip et al., 2021)

2.3 Proses Termodinamika

2.3.1 Perhitungan Siklus *Brayton* Ideal

Langkah-langkah pada siklus *Brayton* dapat dijelaskan melalui penggunaan tabel data udara, di mana data ini menjadi kunci untuk menganalisis kerja kompresi (1-2) dan kerja turbin (3-4) yang idealnya terjadi secara isentropik.

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.1)$$

$$\frac{P_{r3}}{P_{r4}} = \frac{P_3}{P_4} \quad (2.2)$$

Rasio kompresi pada siklus *Brayton* didefinisikan sebagai perbandingan tekanan yang terjadi selama proses kompresi isentropik. Pada kondisi ideal, proses ini berlangsung pada lintasan isentropik sehingga kenaikan tekanan dapat dinyatakan menggunakan persamaan rasio tekanan sebagai berikut:

$$r_p = r_{pc} = r_{pt} \quad (2.3)$$

Rasio tekanan r_p merupakan perbandingan tekanan yang digunakan dalam penentuan efisiensi termal siklus *Brayton* dengan asumsi *cold air standard*. Pada siklus ini, efisiensi termal sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya rasio tekanan turbin. Semakin tinggi nilai rasio tekanan, maka efisiensi termal akan meningkat, dan kecenderungan ini juga berlaku pada turbin gas kondisi nyata. Dengan demikian, persamaan efisiensi termal untuk siklus *Brayton* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$r_n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \quad (2.4)$$

$$r_p = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_{r3}}{P_{r4}} \quad (2.5)$$

Rasio suhu Absolut:

$$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.6)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_p^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.7)$$

Ketika proses kompresi isentropik (1–2), udara yang masuk ke sistem turbin gas pertama kali melewati bagian *inlet* kompresor. Di dalam kompresor, udara tersebut dipampatkan hingga mencapai tekanan yang lebih tinggi. Pada tahap ini diasumsikan tidak terjadi perubahan entropi, karena proses 1–2 dianggap berlangsung secara isentropik. Dengan asumsi tersebut, hubungan termodinamika proses kompresi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$w_c = \dot{m}_{air} x(h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

Pada proses pembakaran isobarik (2–3), udara bertekanan dari kompresor selanjutnya masuk ke ruang bakar. Pada tahap ini, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang pembakaran dan bercampur dengan udara sehingga reaksi pembakaran berlangsung. Proses pembakaran menghasilkan energi panas yang kemudian diserap oleh udara bertekanan tersebut. Selama proses ini, volume gas meningkat tetapi tekanannya dianggap tetap. Dengan asumsi bahwa seluruh panas yang dilepas selama pembakaran sepenuhnya diserap, perpindahan kalor terjadi tanpa adanya tambahan energi lain yang dapat dibangkitkan di dalam turbin gas. Untuk kondisi *steady state* pada suatu volume kendali, keseimbangan massa dan energi diterapkan. Dari proses pembakaran tersebut diperoleh persamaan berikut:

$$Q_{in} = \dot{m}_{fuel} \times LHV \quad (2.9)$$

Pada proses ekspansi isentropik (3–4), Udara bertekanan yang telah menerima energi panas dari proses pembakaran kemudian mengalir menuju turbin untuk mengalami ekspansi. Gas panas ini memutar sudu-sudu turbin sehingga menghasilkan kerja mekanik. Sebagian dari energi yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan kompresor, sementara sisanya dikonversi menjadi tenaga penggerak bagi generator.

$$w_t = \dot{m}_{fuel} \times (h_3 - h_4) \quad (2.10)$$

Pada proses pembuangan panas (4–1), Udara yang keluar dari turbin masih menyimpan sejumlah energi panas. Panas sisa ini kemudian dilepaskan ke lingkungan, sehingga kondisi udara kembali mendekati keadaan awal dan siklus dapat kembali berlanjut ke tahap kompresi 1–2.

$$\dot{Q}_{out} = (\dot{m}_{air} \times \dot{m}_{fuel}) \times (h_4 - h_1) \quad (2.11)$$

Kerja Netto Ideal:

$$w_{netto} = w_t - w_c \text{ Laju} \quad (2.12)$$

Aliran Gas Hasil Pembakaran:

$$\dot{m}_{fuel\ bb} = w_t - w_c \quad (2.13)$$

Laju Aliran Udara:

$$Q_{in} = (\dot{m}_{fuel\ bb} \times h_3) - (\dot{m}_{air} \times h_2) \quad (2.14)$$

$$Q_{in} = ((\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}) \times h_3) - (\dot{m}_{air} \times h_2) \quad (2.15)$$

$$\dot{m}_{air} = \frac{(\dot{Q}_{in} - (\dot{m}_{fuel} \times h_3))}{(h_3 - h_2)} \quad (2.16)$$

Efisiensi Termal Turbin Gas Ideal:

$$\eta_{ttg} = \frac{(w_t - w_c)}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Heat Rate Netto Ideal:

$$HeatRateNetto = \frac{Q_{in}}{w_{netto}} \quad (2.18)$$

2.3.2 Perhitungan Siklus *Brayton* Aktual

Agar sebuah mesin pembangkit mampu menghasilkan daya netto yang tinggi, diperlukan efisiensi turbin dan kompresor yang tetap berada pada tingkat yang relatif baik. Setelah nilai efisiensi kompresor diperoleh, serta diketahui entalpi udara pada kondisi masuk dan keluar kompresor, efisiensi aktual kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_c = \frac{(h_2' - h)}{(h_2 - h_1)} \times 100\% \quad (2.19)$$

Kompresor dan generator memperoleh tenaga dari turbin gas. Untuk menentukan efisiensi turbin gas, daya yang diperlukan oleh generator dibandingkan dengan daya netto yang dihasilkan turbin. Hubungan ini dinyatakan melalui persamaan berikut untuk menghitung efisiensi turbin aktual:

$$\eta_{turbin} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_4')} \times 100\% \quad (2.20)$$

Pada proses 1–2, perhitungan kompresi dilakukan saat udara dari atmosfer memasuki sistem turbin gas melalui *inlet* kompresor. Ketika udara dipampatkan, temperatur keluaran kompresor meningkat dan efisiensi kompresor cenderung menurun, sehingga kebutuhan kerja untuk proses kompresi bertambah besar. Dengan kondisi tersebut, besar kerja yang diperlukan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$W_{ca} = \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{\eta_c} \quad (2.21)$$

Efisiensi *Combuster*:

$$\eta_{combustor} = \frac{(T_2 - T_3)}{(T_{2'} - T_3)} \times 100\% \quad (2.22)$$

Turbin gas berfungsi untuk menggerakkan kompresor sekaligus memutar generator. Efisiensi turbin gas dapat ditentukan dengan membandingkan daya yang dibutuhkan oleh generator dengan daya netto yang dihasilkan, yang dapat diekspresikan melalui suatu persamaan.

$$W_{ta} = \dot{m}_{fuel\ bb} \times (h_2 - h_1) \times \eta_t \quad (2.23)$$

Kerja Netto Aktual:

$$W_{nettoaktual} = W_{ta} - W_{ca} \quad (2.24)$$

Efisiensi Termal Turbin Gas Aktual:

$$\eta_{ttg} = \frac{(w_{ta} - w_{ca})}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.25)$$

Jumlah energi yang dibutuhkan oleh unit pembangkit untuk menghasilkan satu unit *output* atau per kWh dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Heat\ Rate\ Netto_{Aktual} = \frac{Q_{in}}{W_{netto\ aktual}} \quad (2.26)$$

Back Work Ratio dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$BWR = \frac{W_{kompresor}}{W_{turbin}} \times 100\% \quad (2.27)$$

2.3.3 Perhitungan *Specific Fuel Consumption* (SFC)

Specific Fuel Consumption (SFC) adalah parameter yang digunakan untuk menilai kinerja termal mesin, menunjukkan jumlah massa bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan daya keluaran tertentu. Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan bahwa mesin bekerja lebih efisien karena kebutuhan bahan bakarnya lebih kecil untuk menghasilkan energi yang sama (Çengel & Boles, 2019). SFC dirumuskan sebagai:

$$SFC = \frac{m}{P} \quad (2.28)$$

Keterangan:

SFC : Pemakaian bahan bakar per daya yang dihasilkan (g/Kwh)

m : Laju aliran massa bahan bakar (g/h)

P : Daya keluaran turbin gas (kW)

Rumus ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa efektif mesin mengubah bahan bakar menjadi energi berguna. Rumus ini menjadi dasar dalam perhitungan kinerja pembangkit untuk mengevaluasi efisiensi penggunaan bahan bakar selama operasi.

2.4 Faktor – Faktor Yang Mempengaruhi Efisiensi *Turbine Inspection*

Secara umum, faktor–faktor yang memengaruhi efisiensi turbin yang teridentifikasi saat *Turbine Inspection* tidak hanya ditentukan oleh “hasil ukur performa”, tetapi sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik jalur aliran (*flow path*), tingkat kebocoran internal, kualitas pembakaran/energi masuk, hingga stabilitas mekanik rotor–bearing. Dengan kata lain, inspeksi berperan memastikan bahwa turbin bekerja mendekati desainnya: aliran fluida tetap bersih dan terarah, rugi-rugi kebocoran terkendali, serta geometri komponen tidak berubah akibat aus, deformasi, atau kerusakan. Karena itu, pelaksanaan inspeksi perlu menekankan pemeriksaan pada area yang paling berdampak terhadap losses aerodinamika,

losses kebocoran, dan losses akibat ketidakstabilan mekanik. Kesesuaian Pedoman Perawatan dan Kesiapan Sumber Daya

2.4.1 Kondisi Unit Sebelum Pembongkaran

Faktor pertama adalah kondisi permukaan sudu (*blade*) dan vane karena komponen ini paling langsung menentukan kualitas aerodinamika turbin. Erosi, korosi, pitting, maupun deposit (*fouling*) akan meningkatkan kekasaran permukaan dan mengubah profil sudu sehingga aliran tidak lagi optimal, menyebabkan rugi-rugi meningkat dan efisiensi turun. Dalam inspeksi, kondisi leading edge/trailing edge, tingkat deposit, serta indikasi retak atau deformasi perlu diperhatikan karena kerusakan kecil pada profil dapat menghasilkan penurunan efisiensi yang signifikan, terutama pada stage awal yang memegang porsi energi besar

2.4.2 Clearance dan Kondisi Sealing (Kebocoran Internal)

Faktor berikutnya adalah besarnya clearance dan efektivitas sealing, karena kebocoran internal merupakan sumber losses yang sering dominan. Tip clearance yang membesar, seal aus (misalnya labyrinth/brush seal), atau adanya rub mark yang mengindikasikan ketidaknormalan akan menaikkan leakage flow sehingga energi tidak sepenuhnya dikonversi menjadi kerja pada rotor. Pemeriksaan clearance, kondisi seal, dan keseragaman celah sepanjang keliling menjadi penting untuk memastikan leakage tetap dalam batas desain dan efisiensi tidak tergerus oleh bypass flow.

2.4.3 Kualitas Pembakaran/Distribusi Temperatur dan Dampaknya ke Turbin (Gas Turbine)

Kualitas inspeksi mekanik sangat dipengaruhi oleh pengendalian kontaminasi dan pencegahan benda asing (*foreign object*). Manual menekankan penggunaan temporary cover untuk menutup opening saat *disassembly* dan *re-assembly* agar benda asing tidak masuk ke turbin, serta menjaga area sekitar turbin tetap bersih dari objek yang tidak diperlukan.

Pada kondisi opening tidak memungkinkan untuk ditutup, tools perlu ditether agar tidak jatuh ke dalam unit. Selain itu, manual juga menyarankan penutupan opening/flange dan celah yang terbuka selama pekerjaan untuk mencegah masuknya debris/kotoran.

2.4.4 Kondisi Sistem Inlet dan Kompresor

Faktor lain yang memengaruhi efisiensi (secara keseluruhan unit) adalah kondisi inlet dan kompresor, karena perubahan mass flow dan pressure ratio akan berdampak langsung pada energi yang tersedia untuk turbin. Filter inlet yang kotor atau pressure drop yang tinggi menurunkan aliran udara sehingga output dan efisiensi turun. Compressor fouling juga menurunkan efisiensi kompresor dan memaksa operasi bergeser dari titik desain, yang pada akhirnya memperburuk heat rate. Saat inspeksi/*performance review*, parameter seperti ΔP filter, kondisi ducting, serta indikasi fouling dari tren performa menjadi penentu apakah turbin tampak “kurang efisien” akibat sisi hulu yang tidak sehat.

2.4.5 Pendinginan *Hot Section* dan Kondisi *Coating*

Efisiensi turbin juga dipengaruhi oleh kondisi sistem pendinginan serta coating pada hot section. *Cooling hole* yang tersumbat, jalur pendinginan yang tidak bersih, atau kerusakan TBC (*thermal barrier coating*) dapat meningkatkan temperatur logam, mempercepat degradasi, serta meningkatkan kekasaran permukaan yang memicu tambahan losses. Dalam inspeksi, indikasi *discoloration*, *burn mark*, *spalling coating*, dan bukti *blockage* pada *cooling passage* penting untuk dievaluasi karena masalah pendinginan sering menjadi akar penurunan efisiensi sekaligus pemicu kerusakan berantai.

2.4.6 Stabilitas Mekanik: Vibrasi, *Alignment*, *Bearing*, dan Potensi Rub

Faktor mekanik lain yang memengaruhi efisiensi adalah stabilitas rotor–bearing dan kualitas *alignment*, karena ketidakstabilan mekanik dapat memicu *rubbing* dan perubahan *clearance* yang akhirnya meningkatkan *losses*. *Unbalance*, *misalignment*, *bearing wear*, atau rotor bow akan tercermin pada kenaikan vibrasi dan orbit yang memburuk, serta dapat menimbulkan *rub marks* pada *seal* maupun *blade tip*. Inspeksi yang baik tidak hanya memeriksa kerusakan komponen, tetapi juga menautkan temuan mekanik (*vibrasi/bearing*) dengan potensi penurunan efisiensi akibat *clearance abnormal* dan *friction losses*