BAB II
TINJAUANPUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Prinsip Kerja PLTGU

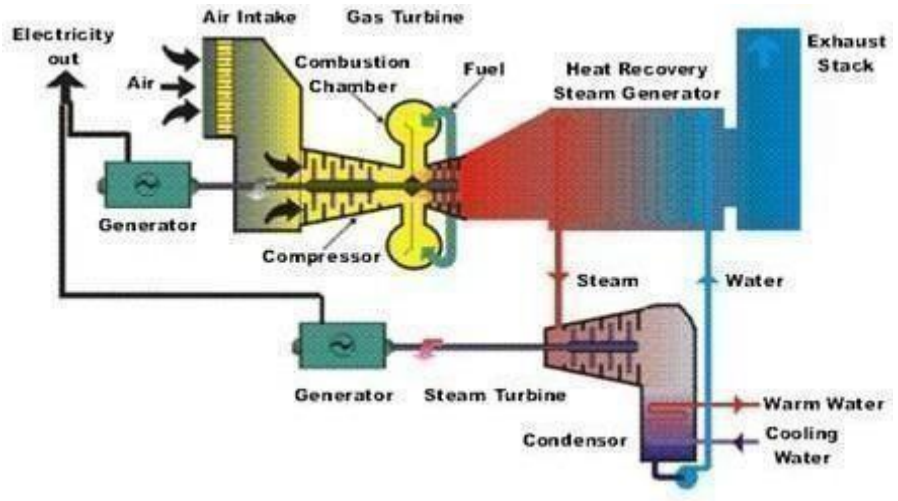
Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan salah satu sistem pembangkit listrik modern yang menggabungkan dua siklus termodinamika, yaitu siklus Brayton pada turbin gas dan siklus Rankine pada turbin uap, dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi secara keseluruhan. Pada sistem ini, energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran pada turbin gas tidak langsung dibuang ke lingkungan, melainkan dimanfaatkan kembali melalui *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang digunakan untuk memutar turbin uap. Dengan memanfaatkan kembali energi panas tersebut, sistem PLTGU mampu meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik secara signifikan serta mengurangi kehilangan energi dalam proses pembangkitan (Saputra et al., 2023).

Selain itu, penerapan sistem PLTGU memberikan keuntungan yang signifikan dalam hal peningkatan efisiensi termal serta pengurangan konsumsi bahan bakar dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik berbasis satu siklus. Hal ini disebabkan oleh adanya proses pemanfaatan ulang energi panas dari gas buang turbin gas, sehingga kehilangan energi dapat diminimalkan dan daya *output* yang dihasilkan menjadi lebih besar. Dengan karakteristik tersebut, PLTGU menjadi salah satu teknologi pembangkitan listrik yang banyak digunakan dalam sistem ketenagalistrikan modern, terutama dalam memenuhi kebutuhan energi dalam skala besar dengan tingkat efisiensi yang tinggi (Purba & Yuwana, 2024).

Dengan memanfaatkan kembali energi panas dari gas buang, PLTGU mampu mencapai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan pembangkit konvensional berbasis satu siklus. Efisiensi sistem PLTGU dapat mencapai

lebih dari 50–60%, tergantung pada kondisi operasi dan desain sistem (Putra et al., 2023).

Selain aspek efisiensi, sistem PLTGU juga memiliki keunggulan dan fleksibilitas operasional dan respon terhadap perubahan beban. Turbin gas pada PLTGU mampu beroperasi dengan waktu *start-up* yang relative cepat dibandingkan pembangkit berbasis uap konvensional, sehingga efektif digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak (Boyce, 2018).



Gambar 2.1 Proses Kerja PLTGU

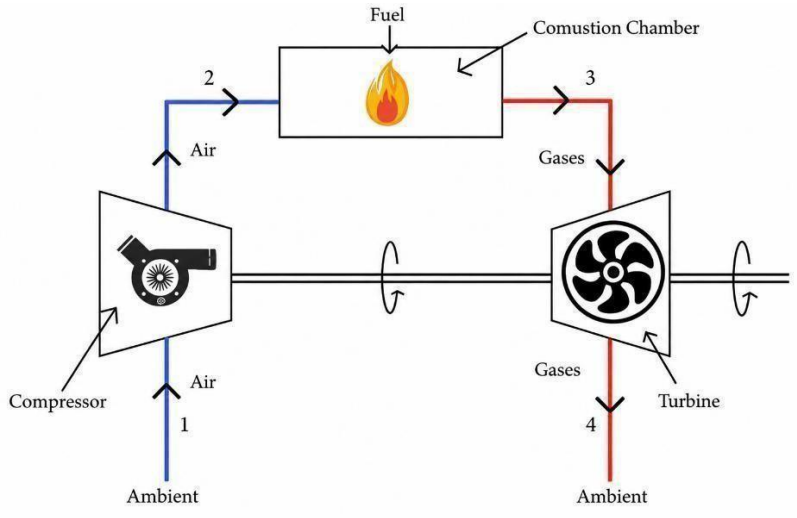
Sumber: https://esuhartono

Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Gas merupakan pembangkit listrik yang memiliki nilai efisiensi yang cukup tinggi, karena dapat memanfaatkan panas secara maksimal sehingga dapat menghasilkan enevrgi listrik dalam skala besar.

2.1.2 Siklus pada PLTGU

1. Siklus Terbuka

   Sebuah turbin gas dengan siklus terbuka terdiri dari kompresor, ruang bakar, dan turbin. Kompresor menghisap udara atmosfer dan menaikkan tekanannya. Kalor ditambahkan dengan cara membakar udara bertekanan dengan bahan bakar. Suhu pada tahapan ini akan meningkat. Udara dan bahan bakar yang dibakar menjadi gas yang bertekanan dan bersuhu tinggi.

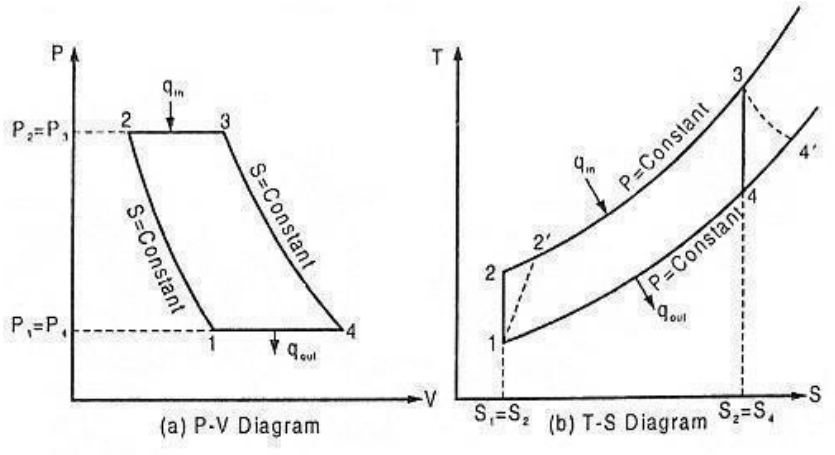


Gambar 2.2 Siklus Terbuka PLTG

Sumber : https://www-linquip-com.translate.goog/

Gas bertekanan selanjutnya mengalami ekspansi di dalam turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi tersebut sebagian digunakan untuk menggerakkan kompressor dan peralatan pendukung lainnya, sedangkan sisanya dimafaatkan untuk memutar generator guna menghasilkan energi listrik. Karena udara dari atmosfer masuk ke dalam kompressor dan gas buang dari turbin langsung dilepaskan ke atmosfer, maka fluida kerja pada sistem ini harus terus diperbarui.

a) Siklus *Brayton*



Gambar 2.3 Siklus *Brayton*

Sumber : https://www.eeeguide.com

Proses 1–2 : Pada tahap ini, udara dari atmosfer masuk ke dalam kompressor dan mengalami proses kompresi. Proses ini

berlangsung secara isentropik, yaitu tanpa adanya perpindahan kalor yang signifikan ke sistem atau dari sistem. Akibatnya, tekanan dan temperature udara meningkat secara signifikan selama proses berlangsung.

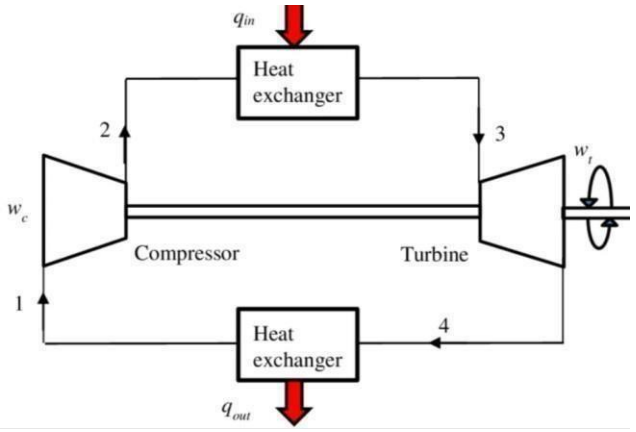
Proses 2–3 : Pada langkah ini udara bertekanan tinggi hasil kompresi kemudian dialirkan ke ruang bakar. Di dalam ruang bakar, udara dicampur dengan bahan bakar dan mengalami proses pembakaran pada tekanan yang relatif konstan. Proses ini menyebabkan terjadinya peningkatan temperatur yang sangat tinggi akibat penambahan energi panas ke dalam sistem.

Proses 3–4 : Gas hasil pembakaran yang memiliki tekanan dan temperatur tinggi selanjutnya dialirkan ke turbin. Di dalam turbin, gas mengalami proses ekspansi secara isentropik yang menghasilkan energi mekanik. Energi ini sebagian digunakan untuk menggerakkan kompresor, sedangkan sisanya dimanfaatkan untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Proses 4–5 : Setelah melewati turbin, gas sisa pembakaran dikeluarkan ke atmosfer. Karena gas tersebut tidak digunakan kembali dalam siklus, maka sistem memerlukan suplai udara baru dari lingkungan secara terus-menerus agar proses dapat berlangsung secara berkelanjutan.

2. Siklus Tertutup

Siklus tertutup (*closed cycle*) pada sistem kerja turbin gas merupakan suatu sistem termodinamika di mana fluida kerja yang digunakan tidak dibuang ke lingkungan setelah mengalami proses ekspansi, melainkan disirkulasikan kembali secara terus-menerus dalam suatu sistem tertutup.



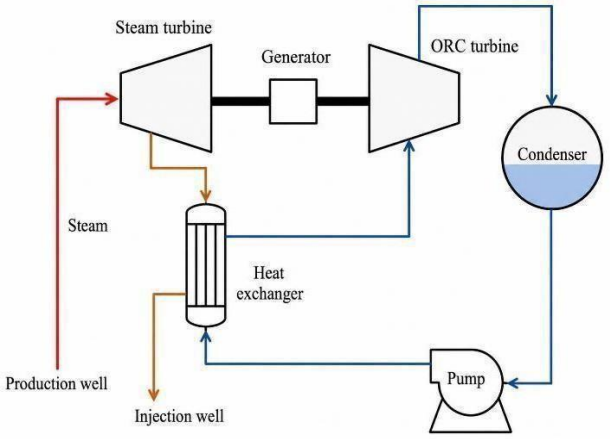
Gambar 2.4 Siklus Tertutup PLTG

Sumber : https://www.researchgate.net/figure

Keunggulan utama dari siklus tertutup adalah efisiensi termal yang lebih tinggi serta kemampuan untuk mengontrol sifat fluida kerja secara optimal. Selain itu, karena fluida kerja tidak bersentuhan langsung dengan lingkungan luar, sistem ini lebih ramah lingkungan dan memungkinkan penggunaan fluida dengan karakteristik khusus.

3. Siklus Kombinasi

Pada siklus ini, energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran pada turbin gas tidak langsung dibuang ke lingkungan, melainkan dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan uap yang digunakan pada turbin uap. Dengan demikian, energi yang sebelumnya terbuang dapat dimanfaatkan secara optimal sehingga efisiensi sistem meningkat secara signifikan.



Gambar 2.5 Siklus Kombinasi PLTGU

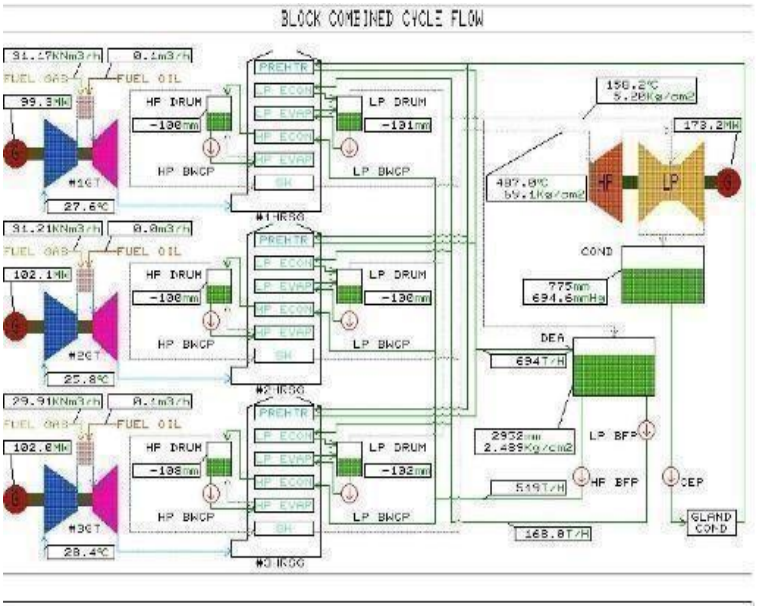
Sumber : https://siujptl.co.id/pembangkit/kamus/combined

Dengan demikian, siklus kombinasi pada PLTGU merupakan teknologi pembangkitan listrik yang sangat efisien dan banyak digunakan dalam sistem ketenagalistrikan modern, terutama untuk memenuhi kebutuhan energi yang besar dengan dampak lingkungan yang lebih rendah.

2.1.3 Prinsip Kerja Turbin Gas

Turbin gas merupakan mesin konversi energi yang bekerja dengan mengubah energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanik melalui proses kompresi, pembakaran, dan ekspansi. Proses ini diawali dengan masuknya udara ke dalam kompresor yang kemudian dikompresi hingga mencapai tekanan tinggi. Udara bertekanan tersebut selanjutnya dicampur dengan bahan bakar di dalam ruang bakar untuk menghasilkan gas panas dengan energi termal yang tinggi (Sitanggang et al., 2023)

Gas panas yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut kemudian dialirkan ke turbin dan mengalami proses ekspansi melalui sudu-sudu turbin, yang menyebabkan turbin berputar dan menghasilkan energi mekanik berupa putaran poros. Energi mekanik ini selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator guna menghasilkan energi listrik, serta sebagian digunakan kembali untuk menggerakkan kompresor sebagai bagian dari sistem kerja turbin gas. Kinerja turbin gas sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional seperti temperatur udara masuk, tekanan kerja, serta kondisi komponen internal turbin, sehingga apabila terjadi degradasi pada komponen maka efisiensi sistem akan menurun dan konsumsi bahan bakar akan meningkat (Purba & Yuwana, 2024)



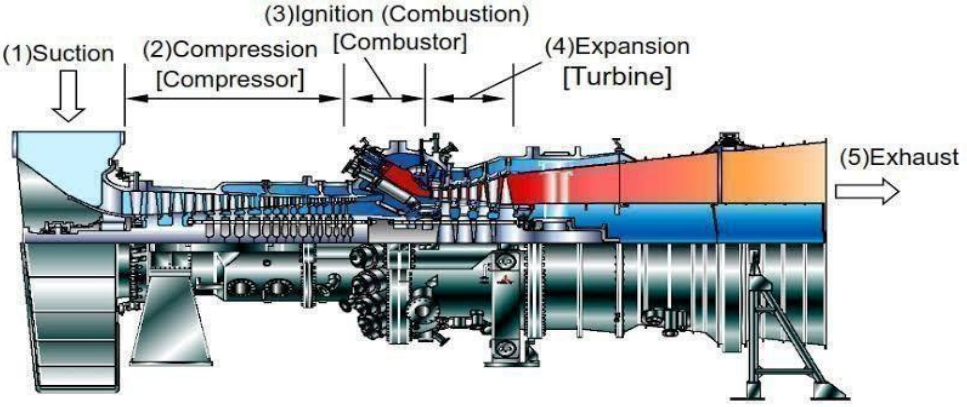
Gambar 2.6 Prinsip Kerja PLTGU

Sumber : PT PLN NP UP GRESIK

Gas buang yang dihasilkan dari proses ekspansi masih memiliki temperatur tinggi. Pada sistem pembangkit sederhana, gas ini dibuang ke lingkungan, sedangkan pada sistem *combined cycle*, panas tersebut dimanfaatkan kembali untuk meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, turbin gas sering dikombinasikan dengan sistem lain seperti PLTGU untuk memperoleh performa yang lebih optimal (Alam et al., 2024).

2.1.4 Komponen Utama Turbin Gas

Pembangkit Listrik Tenaga Gas ini mempunyai komponen utama, terdiri dari :



Gambar 2.7 Kompresor PLTG

Sumber : https://media.neliti.com

1. Kompresor

   Kompresor merupakan komponen yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan udara sebelum memasuki ruang bakar. Udara dari lingkungan dihisap dan dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tertentu. Proses kompresi ini sangat penting karena menentukan efisiensi pembakaran pada tahap selanjutnya. Pada turbin gas, kompresor yang umum digunakan adalah tipe aksial, yang terdiri dari beberapa tahap sudu berputar (rotor) dan sudu diam (stator).

2. Combuster

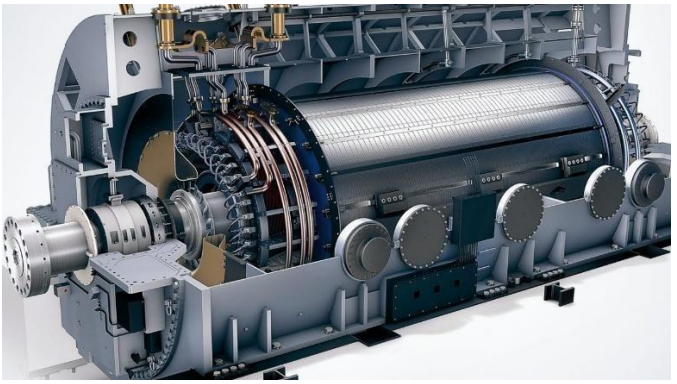
   Ruang bakar adalah tempat terjadinya proses pembakaran anatara udara bertekanan tinggi dengan temperature yang sangat tinggi. Desain ruang bakar harus mampu menjaga kestabilan nyala api serta mengontrol emisi gas buang, sehingga proses pembakaran dapat berlangsung secara efisien dan aman.

3. Turbin Gas

   Turbin gas merupakan komponen yang berfungsi untuk mengubah energi termal dari gas panas hasil pembakaran menjadi energi mekanik. Gas panas bertekanan tinggi akan mengalir melalui sudut-sudut turbin dan mengalami ekspansi, sehingga menyebabkan turbin berputar. Energi putaran ini digunakan untuk menggerakkan kompresor serta generator listrik. Kinerja turbin gas sangat dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan gas masuk.

4. Generator

   Generator adalah komponen pada PLTGU yang mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran turbin menjadi energi listrik.

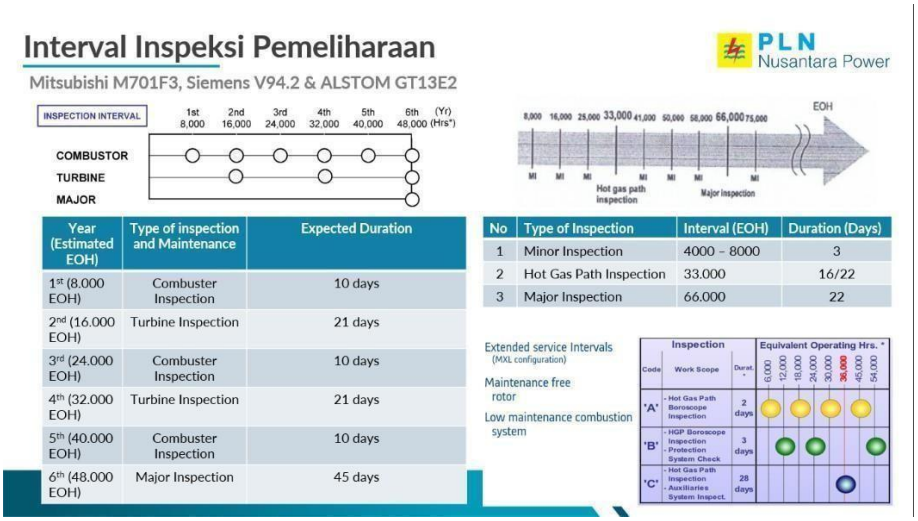


Gambar 2.8 Generator

Sumber : https://www.mindluster.com/certificate/9915

2.1.5 *Maintenance* Turbin Gas

Pada gas turbine PLTGU terdapat beberapa jenis maintenance diantaranya *Combustion Inspection*, *Turbine Inspection*, dan *Major overhaul Inspection*.



Gambar 2.9 Interval Inspeksi Pemeliharaan

Sumber : PT PLN Nusantara Power UP Gresik

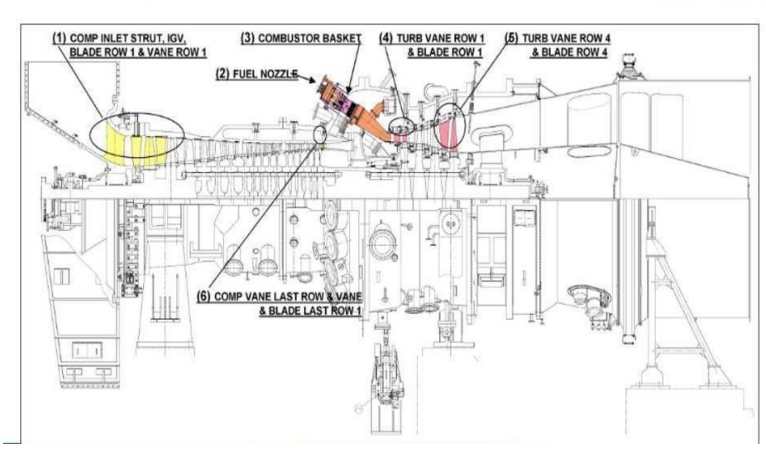
Pada peneitian ini akan membahas tentang *maintenance* pada *Turbine Inspection* unit 1.2 PLTGU UP Gresik. Pada turbin gas unit 1.2 perawatan rutin yang dilakukan yaitu *preventive maintenance* dengan melakukan pengecekan pada setiap *equipmen*t dari gas turbin setiap minggunya, mulai dari komponen utama hingga komponen penunjang dari PLTGU. Pemeriksaan ini dilakukan dengan tujuan untuk meminimalisir terjadinya kerusakan pada komponen PLTGU akibat dari unit yang bekerja secara terus menerus. (Taufik, 2021)

Gambar di atas berfungsi menunjukkan interval waktu pelaksanaan ketiga jenis inspeksi tersebut, sebagai gambaran umum sebelum masing-masing jenis inspeksi dibahas satu per satu. Setelahnya naskah menjelaskan bahwa penelitian ini fokus pada Turbine Inspection unit 1.2, dan bahwa pola maintenance di PT PLN Nusantara Power UP Gresik sudah diatur oleh manajemen outage lengkap dengan rincian equipment yang akan diganti, dibongkar, atau diperbaiki pada tiap pelaksanaannya..

Berikut penjelasan tentang *maintenance* pada turbin gas:

a. *Combustion Inspection* :

Combustion inspection merupakan kegiatan pemeliharaan berkala pada turbin gas yang difokuskan pada sistem pembakaran, khususnya komponen seperti *combustion liner, fuel nozzle, transition piece*, serta *ignitor* yang secara langsung terpapar temperatur tinggi selama proses operasi. Kegiatan ini bertujuan untuk mendeteksi adanya kerusakan awal seperti retakan material, oksidasi, serta penumpukan *deposit* karbon yang dapat mengganggu kestabilan proses pembakaran. Selain itu, *combustion inspection* juga mencakup proses pembersihan dan penggantian komponen yang mengalami penurunan performa guna menjaga efisiensi pembakaran serta keandalan sistem turbin gas secara keseluruhan (Mahfuzah et al., 2024)



Gambar 2.9 Scoope Combustion Inpection

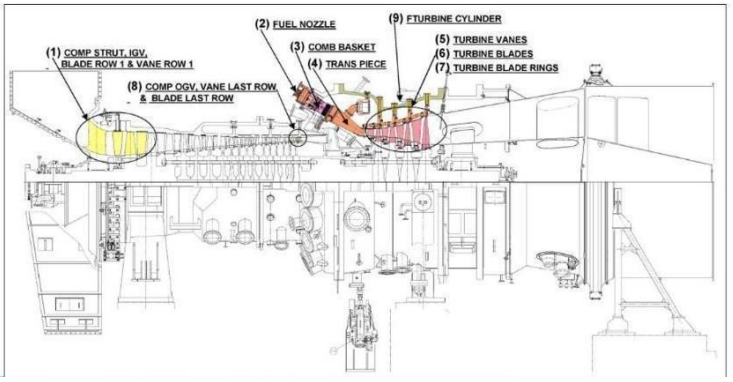
Sumber : PT PLN Nusantara Power UP Gresik

Combustion Inspection sebagai kegiatan pemeliharaan berkala yang difokuskan pada sistem pembakaran, mencakup komponen seperti combustion liner, fuel nozzle, transition piece, dan ignitor yang terpapar langsung temperatur tinggi. Karena itu, gambar ini menggambarkan ruang lingkup atau cakupan pekerjaan (scope) dari Combustion Inspection, yaitu bagian-bagian mana saja pada sistem pembakaran yang diperiksa untuk mendeteksi retakan, oksidasi, dan penumpukan deposit karbon sebagaimana dijelaskan pada paragraf sebelumnya.

b. *Turbine Inspection* :

Turbine Inspection atau yang dikenal sebagai *Hot Gas Path Inspection* (HGPI) merupakan kegiatan inspeksi yang dilakukan pada bagian turbin gas yang mengalami paparan langsung terhadap gas panas hasil pembakaran, seperti *turbine blade, nozzle guide vane*, serta rotor. Proses inspeksi ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi material yang beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi, sehingga rentan mengalami kerusakan seperti *thermal fatigue, creep*, dan erosi. Dalam pelaksanaannya, *turbine inspection* dilakukan melalui pembongkaran sebagian komponen serta penggunaan metode pengujian seperti *visual inspection* dan *non-destructive testing* (NDT) untuk mendeteksi kerusakan tanpa merusak struktur komponen (Anzip et al., 2021)

Gambar 2.10 Scoope Turbine Inspection



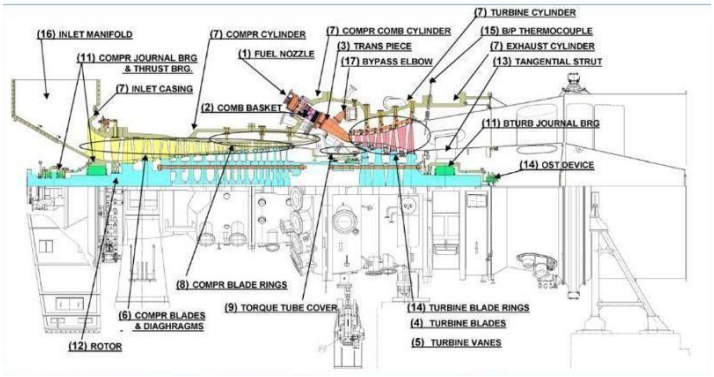
Sumber : PT PLN Nusantara Power UP Gresik

Turbine Inspection atau Hot Gas Path Inspection (HGPI), yaitu inspeksi yang difokuskan pada bagian turbin yang terpapar langsung gas panas hasil pembakaran seperti turbine blade, nozzle guide vane, dan rotor. Maka gambar ini menggambarkan cakupan area yang diperiksa dalam Turbine Inspection, sejalan dengan penjelasan bahwa inspeksi ini dilakukan lewat pembongkaran sebagian komponen serta metode visual inspection dan non-destructive testing.

c. *Major Overhaul inspection* :

Major Overhaul inspection merupakan kegiatan pemeliharaan menyeluruh yang dilakukan pada turbin gas dalam interval waktu tertentu dengan cakupan pemeriksaan yang lebih luas dibandingkan *combustion inspection* maupun *turbine inspection*. Pada tahap ini, seluruh komponen utama turbin gas dibongkar untuk dilakukan pemeriksaan secara detail, pembersihan, serta penggantian komponen yang telah mengalami degradasi signifikan. Kegiatan ini bertujuan untuk mengembalikan kondisi turbin mendekati kondisi optimal serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem pembangkitan dalam jangka panjang (Mahfuzah et al., 2024)

Gambar 2.11 Scoope Major Inspection



Sumber : PT PLN Nusantara Power UP Gresik

Major Overhaul Inspection sebagai kegiatan pemeliharaan paling menyeluruh dengan cakupan pemeriksaan lebih luas dibanding *Combustion* dan *Turbine Inspection*, di mana seluruh komponen utama dibongkar untuk diperiksa detail, dibersihkan, dan diganti bila sudah mengalami degradasi signifikan. Gambar ini pun menunjukkan luasnya

scope pekerjaan *Major Inspection* dibanding dua jenis inspeksi sebelumnya.

2.1.6 *Turbine Inspection*

Turbine inspection merupakan salah satu kegiatan pemeliharaan berkala pada turbin gas yang bertujuan untuk mengevaluasi kondisi komponen utama yang beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi, khususnya pada bagian jalur gas panas seperti *turbine blade, nozzle, vane*, dan rotor. Kegiatan ini dilakukan untuk mengidentifikasi adanya kerusakan atau degradasi material yang dapat mempengaruhi performa dan keandalan turbin gas selama operasi, mengingat komponen-komponen tersebut bekerja dalam kondisi ekstrem yang rentan terhadap kerusakan seperti erosi, korosi, *thermal fatigue*, *dan creep* **(**Anzip et al., 2021)

Turbine inspection sering dikenal sebagai *Hot Gas Path Inspection* (HGPI), yaitu inspeksi yang difokuskan pada bagian turbin yang dilalui oleh gas panas hasil pembakaran. Kegiatan ini biasanya dilakukan setelah turbin mencapai jumlah jam operasi tertentu dan mencakup pembongkaran sebagian komponen untuk memungkinkan pemeriksaan yang lebih mendalam terhadap kondisi fisik material. Dalam proses ini, komponen seperti sudu turbin, *nozzle*, dan *vane* akan dibersihkan, diperiksa, serta dianalisis tingkat keausannya untuk menentukan kelayakan operasi selanjutnya (Mahfuzah et al., 2024)

Selain pemeriksaan visual, *turbine inspection* juga melibatkan metode pengujian non-destruktif (*Non-Destructive Testing*/NDT) seperti *ultrasonic testing, dye penetrant testing*, dan *borescope inspection* yang bertujuan untuk mendeteksi cacat material yang tidak terlihat secara kasat mata. Penggunaan metode ini sangat penting karena banyak kerusakan pada turbin gas terjadi pada tingkat mikrostruktur akibat paparan temperatur tinggi dan beban operasi yang berulang, sehingga diperlukan teknik inspeksi yang mampu mendeteksi kerusakan secara dini tanpa merusak komponen. Pelaksanaan turbine inspection juga memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan performa turbin gas, khususnya dalam hal efisiensi termal, daya *output*, serta konsumsi bahan bakar. Berdasarkan hasil penelitian, setelah dilakukan turbine inspection terjadi peningkatan efisiensi siklus, penurunan konsumsi bahan bakar spesifik, serta peningkatan daya netto yang dihasilkan oleh turbin gas.

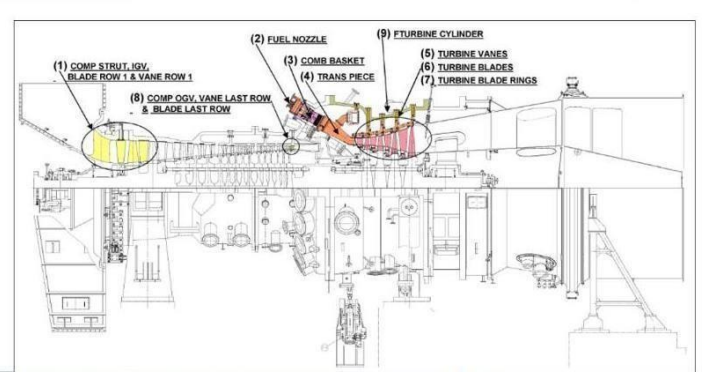
Hal ini menunjukkan bahwa kondisi komponen turbin memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja sistem pembangkitan, sehingga kegiatan inspeksi menjadi sangat penting dalam menjaga performa sistem secara keseluruhan (Anzip et al., 2021)

Strategi *maintenance* dan *inspection* yang tepat memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keandalan (*reliability*) dan ketersediaan (*availability*) turbin gas selama operasi. Kegiatan inspeksi yang dilakukan secara berkala memungkinkan deteksi dini terhadap kerusakan atau degradasi komponen seperti *turbine blade, nozzle*, dan *combustion system*, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan yang lebih besar. Selain itu, penerapan metode *maintenance* yang terencana juga dapat mengurangi risiko terjadinya *forced outage*, meningkatkan efisiensi operasional, serta memperpanjang umur pakai peralatan. Dengan demikian, *turbine inspection* tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan pemeriksaan rutin, tetapi juga sebagai bagian dari strategi optimasi performa sistem pembangkitan secara keseluruhan (Brahimi et al., 2024).

2.1.6.1 Proses *Turbine Inspection*

Proses *turbine inspection* diawali dengan tahap persiapan (*preparation*), di mana turbin gas dihentikan operasinya (shutdown) dan dilakukan pengamanan sistem untuk memastikan kegiatan inspeksi dapat dilakukan dengan aman. Pada tahap ini juga dilakukan perencanaan pekerjaan yang mencakup penjadwalan inspeksi, identifikasi komponen yang akan diperiksa, serta penyediaan peralatan yang diperlukan. Tahap persiapan menjadi sangat penting karena menentukan kelancaran proses inspeksi serta meminimalkan risiko kesalahan selama pelaksanaan maintenance (Mahfuzah et al., 2024) Tahap selanjutnya adalah proses pembongkaran (disassembly), yaitu kegiatan membuka casing turbin dan melepas sebagian komponen untuk memberikan akses ke bagian internal turbin yang akan diperiksa. Pada *turbine inspection*, pembongkaran biasanya dilakukan secara parsial dengan fokus pada bagian jalur gas panas seperti *combustion section* dan *turbine section*. Proses ini dilakukan secara sistematis

sesuai prosedur teknis agar tidak menimbulkan kerusakan tambahan pada komponen selama proses pembongkaran berlangsung (Anzip et al., 2021)



Gambar 2.12 *Turbine Inspection*
Sumber : PT PLN Nusantara Power Up Gresik

Setelah proses pembongkaran, dilakukan tahap inspeksi visual terhadap komponen utama turbin gas seperti *turbine blade*, *nozzle*, *vane*, dan rotor. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi adanya kerusakan seperti retakan, deformasi, korosi, erosi, serta penumpukan deposit yang dapat mengganggu performa turbin gas. Selain itu, dilakukan juga pengamatan terhadap kondisi permukaan material untuk memastikan bahwa komponen masih berada dalam batas aman operasional (Mahfuzah et al., 2024)

Selain inspeksi visual, proses *turbine inspection* juga melibatkan metode pengujian non-destruktif (Non-Destructive Testing/NDT) seperti *borescope inspection* dan pengujian lainnya untuk mendeteksi kerusakan yang tidak terlihat secara kasat mata. Metode ini digunakan untuk memastikan kondisi material secara menyeluruh tanpa merusak komponen, sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih dini dan tindakan perbaikan dapat segera dilakukan (Anzip et al., 2021)

Tahap berikutnya adalah evaluasi kondisi komponen (evaluation), yaitu analisis terhadap hasil inspeksi untuk menentukan kelayakan komponen dalam operasi selanjutnya. Pada tahap ini dilakukan penilaian

apakah komponen masih dapat digunakan, perlu diperbaiki, atau harus diganti. Keputusan ini sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi, keandalan, serta umur pakai turbin gas (Mahfuzah et al., 2024)

Setelah evaluasi, dilakukan proses perbaikan dan penggantian komponen (*repair and replacement*) terhadap bagian yang mengalami kerusakan atau penurunan performa. Komponen yang mengalami kerusakan ringan dapat diperbaiki, sedangkan komponen yang sudah melewati batas toleransi operasional harus diganti dengan komponen baru agar turbin dapat kembali bekerja secara optimal. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan kondisi turbin mendekati kondisi semula serta meningkatkan performa sistem pembangkitan (Mahfuzah et al., 2024)

Tahap terakhir adalah *reassembly* dan pengujian operasional, dimana seluruh komponen yang telah diperiksa dan diperbaiki dipasang kembali sesuai dengan prosedur teknis. Setelah itu dilakukan pengujian awal untuk memastikan baturbin dapat beroperasi dengan aman dan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Tahap ini sangat penting karena menjadi penentu keberhasilan seluruh proses *turbine inspection* sebelumturbin kembali dioperasikan dalam sistem pembangkitan listrik (Anzip et al., 2021)

2.1.6.2 Komponen Yang Diperiksa

Dalam kegiatan *turbine inspection*, komponen yang diperiksa difokuskan pada bagian utama yang berpengaruh langsung terhadap kinerja turbin gas. Secara umum, komponen yang diperiksa meliputi:

a) Kompresor (*Compressor Section*)

   Meliputi *compressor blade, rotor, dan stator* yang diperiksa dari sisi fouling, erosi, dan deformasi.

b) Sistem Pembakaran (*Combustion Section*)

   Terdiri dari *fuel nozzle, combustion liner,* dan *transition piece* yang diperiksa terhadap retakan, deposit karbon, dan oksidasi akibat temperatur tinggi.

c) Turbin (*Turbine Section*)

Meliputi *turbine blade dan vane* sebagai komponen kritis yang diperiksa terhadap kerusakan seperti *thermal fatigue*, *creep*, dan retakan.

d) Bearing dan Poros (*Bearing &Shaft***)**

Diperiksa untuk mengetahui adanya keausan, getaran berlebih, serta ketidaksejajaran (*misalignment*).

e) Sistem Pendukung

Meliputi sistem pelumasan, pendingin, dan casing yang diperiksa untuk memastikan tidak terjadi kebocoran atau gangguan operasional.

2.1.6.3 Manfaat *Turbine Inspection*

Turbine inspection memberikan manfaat utama dalam menjaga keandalan dan kontinuitas operasi turbin gas, terutama karena komponen turbin bekerja pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi yang berpotensi menyebabkan degradasi material secara bertahap. Dengan dilakukannya inspeksi secara berkala, kondisi komponen seperti sudu turbin, *nozzle*, dan rotor dapat dipantau secara menyeluruh sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi sebelum berkembang menjadikegagalan sistem yang lebih besar, sehingga risiko terjadinya gangguan operasi dapat diminimalkan (Prasetiyo et al., 2022)

Selain meningkatkan keandalan sistem, *turbine inspection* juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi operasional turbin gas. Komponen yang mengalami *fouling*, *deposit*, atau penurunan kualitas material dapat dibersihkan, diperbaiki, atau diganti sehingga proses pembakaran dan ekspansi gas berlangsung lebih optimal. Hal ini secara langsung berdampak pada peningkatan efisiensi termal serta penurunan *heat rate*, sehingga penggunaan bahan bakar menjadi lebih efisien dalam menghasilkan energi listrik (Purba & Yuwana, 2024)

Kegiatan *turbine inspection* dan *maintenance* yang dilakukan secara berkala memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan performa dan efisiensi turbin gas selama operasi jangka panjang. Melalui inspeksi yang terjadwal, kondisi komponen kritis seperti *compressor*, *combustion system*, serta *turbine section* dapat dipantau secara menyeluruh sehingga

potensi kerusakan seperti *fouling*, erosi, dan degradasi material dapat segera diidentifikasi dan ditangani. Hal ini memungkinkan proses pembakaran dan ekspansi gas berlangsung lebih optimal, sehingga efisiensi termal meningkat dan konsumsi bahan bakar dapat ditekan. Selain itu, kegiatan *turbine inspection* juga berkontribusi dalam mengurangi risiko gangguan operasi serta meningkatkan keandalan sistem pembangkitan secara keseluruhan, sehingga unit pembangkit dapat beroperasi secara lebih stabil dan ekonomis (Kim, 2025)

Manfaat lain dari *turbine inspection* adalah dalam menekan biaya operasional dan pemeliharaan jangka panjang, karena kegiatan inspeksi yang dilakukan secara terjadwal dapat mencegah terjadinya kerusakan besar yang membutuhkan biaya perbaikan yang tinggi. Selain itu, dengan menjaga kondisi turbin tetap optimal, downtime pembangkit dapat diminimalkan sehingga sistem pembangkitan listrik dapat beroperasi secara lebih stabil dan efisien (Mahfuzah et al., 2024)

Di samping manfaat langsung terhadap kondisi fisik komponen turbin, pelaksanaan *turbine inspection* juga memberikan dampak positif terhadap aspek keselamatan kerja (*safety*) dalam operasional pembangkit listrik. Komponen turbin gas yang mengalami kerusakan tanpa terdeteksi, seperti retakan pada *turbine blade* atau *nozzle*, berpotensi menyebabkan kegagalan mekanis mendadak (*mechanical failure*) yang tidak hanya merusak komponen lain di sekitarnya, tetapi juga dapat membahayakan operator dan personel yang bertugas di area pembangkit. Dengan dilakukannya inspeksi secara berkala dan sistematis, potensi kegagalan tersebut dapat dideteksi dan ditangani sejak dini, (Brahimi et al., 2024)

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa manfaat *turbine inspection* bersifat multidimensi, mencakup aspek teknis (efisiensi dan keandalan), aspek ekonomi (penghematan biaya operasional dan perencanaan suku cadang), aspek keselamatan kerja, hingga aspek lingkungan. Hal ini menegaskan bahwa kegiatan *turbine inspection* bukan sekadar kegiatan pemeliharaan rutin, melainkan investasi jangka panjang yang berkontribusi terhadap keberlangsungan operasional pembangkit

2.1.7 Efisiensi Turbin Gas

Efisiensi pada turbin gas dapat diartikan sebagai perbandingan antara energi yang dihasilkan oleh turbin dengan energi yang tersedia pada fluida kevrja yang masuk ke dalam sistem. Efisiensi untuk mengetahui sejauh mana energi potensial dari gas panas dapat dikonversikan menjadi energi mekanik secara efektif. Untuk mengetahui performa termal turbin gas, digunakan pendekatan perhitungan berbasis entalpi, baik secara aktual maupun isentropik. Metode umum untuk menghitung efisiensi turbin gas adalah dengan membandingkan entalpi keluar dan entalpi masuk dari aliran gas. Dalam kondisi ideal, efisiensi dihitung berdasarkan rasio entalpi aktual terhadap entalpi isentropik. Efisiensi turbin gas sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional serta kesehatan komponen utama seperti kompresor, ruang bakar, dan turbin itu sendiri. Penurunan efisiensi umumnya terjadi akibat degradasi komponen, *fouling*, serta ketidaksempurnaan proses pembakaran yang berlangsung selama operasi jangka panjang. Studi menunjukkan bahwa degradasi performa turbin gas dapat menyebabkan penurunan efisiensi hingga sekitar 2–4% yang berdampak langsung pada peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan daya output yang dihasilkan (Kakaras et al., 2021).

Selain dipengaruhi oleh kondisi komponen internal turbin, efisiensi turbin gas juga sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan operasi, seperti temperatur udara masuk kompresor, kelembaban udara, serta tekanan atmosfer di lokasi pembangkit. Semakin tinggi temperatur udara masuk, semakin rendah massa jenis udara yang dihisap kompresor, sehingga massa udara yang tersedia untuk proses pembakaran berkurang dan berdampak pada penurunan daya serta efisiensi yang dihasilkan turbin gas (Boyce, 2018). Oleh karena itu, evaluasi efisiensi turbin gas sebelum dan sesudah *Turbine Inspection* pada penelitian ini turut mempertimbangkan bahwa perubahan performa yang teramati merupakan representasi dari kondisi aktual komponen turbin, bukan semata-mata akibat perubahan kondisi lingkungan pengujian

Perhitungan efisiensi turbin gas menggunakan persamaan: (dikutip : buku Turbin Gas dan Motor Populasi karya Wiranto Arismundar)

$$\eta\text{Turbin} = \frac{860}{HR} \times 100 \quad (2.1)$$

Keterangan

$\eta Turbin$ = *Efisiensi Turbin Gas [%]*

HR = *Heat Rate*

860 = Nilai Konversi baku 1kwh ke kilokalori

2.1.8 *Heat Rate*

Heat rate pada turbin gas merupakan parameter performa yang menunjukkan jumlah energi panas dari bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik dalam satuan tertentu, biasanya dinyatakan dalam kJ/kWh. Secara umum, heat rate didefinisikan sebagai perbandingan antara energi panas yang masuk ke sistem dengan daya listrik bersih yang dihasilkan oleh turbin gas. Menurut penelitian terbaru, *heat rate* digunakan sebagai indikator utama efisiensi pembangkit listrik tenaga gas, di mana nilai *heat rate* yang lebih rendah menunjukkan kinerja sistem yang lebih efisien karena konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit untuk menghasilkan energi listrik yang sama. Sebaliknya, peningkatan nilai *heat rate* mengindikasikan adanya penurunan efisiensi termal yang dapat disebabkan oleh faktor operasional seperti *fouling* pada kompresor, degradasi komponen turbin, atau ketidaksempurnaan proses pembakaran (Cengel & Boles, 2019)

Perhitungan performa *heat rate* turbin gas sebagai berikut :

$$HR = \frac{Q_{in}}{W_{nett}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

HR *(heat rate)* : laju konsumsi energi panas (kJ/kWh)

Qin : energi panas yang masuk ke sistem

Wnett : daya bersih yang dihasilkan turbin (kW)

Nilai *heat rate* memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan efisiensi termal turbin gas, di mana semakin rendah nilai *heat rate* maka semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan, dan sebaliknya. Hubungan ini menjadikan *heat rate* sebagai salah satu indikator yang paling sering

digunakan oleh pelaku industri pembangkitan listrik untuk memantau kinerja unit pembangkit secara harian, karena perhitungannya secara langsung mencerminkan efisiensi konversi energi bahan bakar menjadi energi listrik. Peningkatan *heat rate* pada suatu unit pembangkit umumnya menjadi indikasi awal perlunya dilakukan pemeriksaan atau pemeliharaan terhadap komponen utama turbin gas, termasuk kompresor, ruang bakar, dan turbin itu sendiri .

Selain faktor internal komponen turbin, nilai *heat rate* juga dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar yang digunakan, khususnya nilai kalor (*heating value*) bahan bakar tersebut. Bahan bakar dengan nilai kalor yang lebih tinggi akan menghasilkan energi panas yang lebih besar untuk setiap satuan massa bahan bakar yang dibakar, sehingga pada kondisi komponen turbin yang sama, penggunaan bahan bakar dengan nilai kalor tinggi cenderung menghasilkan nilai *heat rate* yang lebih baik dibandingkan bahan bakar dengan nilai kalor rendah. Oleh karena itu, dalam melakukan analisis perbandingan *heat rate* antar periode pengujian, konsistensi jenis dan kualitas bahan bakar yang digunakan menjadi hal yang penting untuk diperhatikan agar hasil analisis benar-benar mencerminkan perubahan kondisi komponen turbin, bukan akibat perbedaan karakteristik bahan bakar (Çengel & Boles, 2019).

Pemantauan *heat rate* secara berkala juga memberikan manfaat dalam mendukung pengambilan keputusan terkait jadwal pemeliharaan. Ketika nilai *heat rate* aktual menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dari waktu ke waktu, hal ini dapat dijadikan indikasi awal bahwa unit pembangkit memerlukan tindakan pemeliharaan sebelum jadwal inspeksi rutin berikutnya, sehingga penurunan performa yang lebih besar dapat dicegah. Dengan demikian, analisis *heat rate* sebelum dan sesudah *turbine inspection* pada penelitian ini tidak hanya berfungsi untuk mengukur keberhasilan kegiatan inspeksi yang telah dilaksanakan, tetapi juga dapat menjadi acuan dalam menyusun strategi pemeliharaan yang lebih proaktif pada unit-unit pembangkit lainnya.

2.1.9 *Specific Fuel Consumption*

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).

Nilai SFC menggambarkan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik. Sebagai contoh, apabila nilai SFC suatu unit adalah 0,25 kg/kWh, maka secara teoritis diperlukan sekitar 0,25 kg bahan bakar untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik pada kondisi operasi tersebut. Dengan demikian, nilai SFC dapat digunakan untuk membandingkan tingkat penggunaan bahan bakar pada kondisi operasi yang berbeda.

Besarnya nilai SFC tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam sistem, tetapi juga dipengaruhi oleh daya keluaran turbin gas dan kondisi operasi unit. Perubahan temperatur udara masuk kompresor, tekanan udara masuk, kondisi kompresor, kondisi ruang bakar, kondisi sudu turbin, temperatur gas masuk turbin, serta beban pembangkit dapat memengaruhi performa keseluruhan turbin gas dan pada akhirnya memengaruhi nilai SFC. Oleh karena itu, analisis SFC perlu dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi operasi unit pada saat pengambilan data

Dalam penelitian ini, parameter SFC digunakan untuk menganalisis perubahan kinerja Turbin Gas Unit 1.2 PLTGU UP Gresik sebelum dan sesudah pelaksanaan turbine inspection. Perbandingan nilai SFC sebelum dan sesudah inspeksi digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perubahan dalam pemanfaatan bahan bakar setelah dilakukan kegiatan inspeksi dan pemeliharaan. Apabila setelah turbine inspection nilai SFC mengalami penurunan pada kondisi operasi yang sebanding, maka hal tersebut menunjukkan bahwa turbin gas membutuhkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah untuk menghasilkan daya keluaran tertentu. Kondisi tersebut dapat menjadi salah satu indikasi adanya peningkatan performa dan efisiensi operasional unit.

SFC dirumuskan sebagai berikut:

$$SFC = \frac{m}{p} \tag{2.3}$$

Keterangan:

SFC : Pemakaian bahan bakar per daya yang dihasilkan (g/kWh)
m : laju aliran massa bahan bakar (g/h)
p : daya keluaran turbin gas (kWh)

Nilai SFC dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya efisiensi proses pembakaran, kondisi komponen *combustion section* seperti *fuel nozzle* dan *combustion liner*, serta kualitas dan nilai kalor bahan bakar yang digunakan. Pada unit PLTGU yang menggunakan Bahan Bakar Gas (BBG), nilai SFC turut dipengaruhi oleh *Higher Heating Value* (HHV) bahan bakar, sehingga perbandingan SFC antar periode pengujian perlu memperhatikan konsistensi kualitas bahan bakar yang digunakan agar hasil analisis dapat mencerminkan kondisi aktual komponen turbin, bukan variasi kualitas bahan bakar (Çengel & Boles, 2019).

2.2 Penelitian Terkait

Penelitian oleh Mashuri (2025) yang dilakukan di PLTGU PT. PJB UP Gresik menunjukkan bahwa kegiatan *turbine inspection* memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan performa turbin gas. Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi siklus meningkat dari sekitar 47,21% menjadi 50,50% atau mengalami peningkatan sebesar 3,289%. Selain itu, daya netto yang dihasilkan turbin juga meningkat dari 112,3 MW menjadi 116,95 MW atau naik sebesar 4,14%. Hasil ini menunjukkan bahwa inspeksi mampu mengembalikan performa turbin mendekati kondisi optimal setelah mengalami degradasi selama operasi.

Penelitian lain menunjukkan bahwa kondisi kompresor dan turbin memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem, khususnya pada parameter efisiensi dan *heat rate*. Hasil analisis menunjukkan bahwa fouling pada kompresor dapat menyebabkan penurunan efisiensi hingga sekitar 3–5% serta peningkatan *heat rate* akibat terganggunya aliran udara masuk ke ruang bakar. Penelitian ini dilakukan

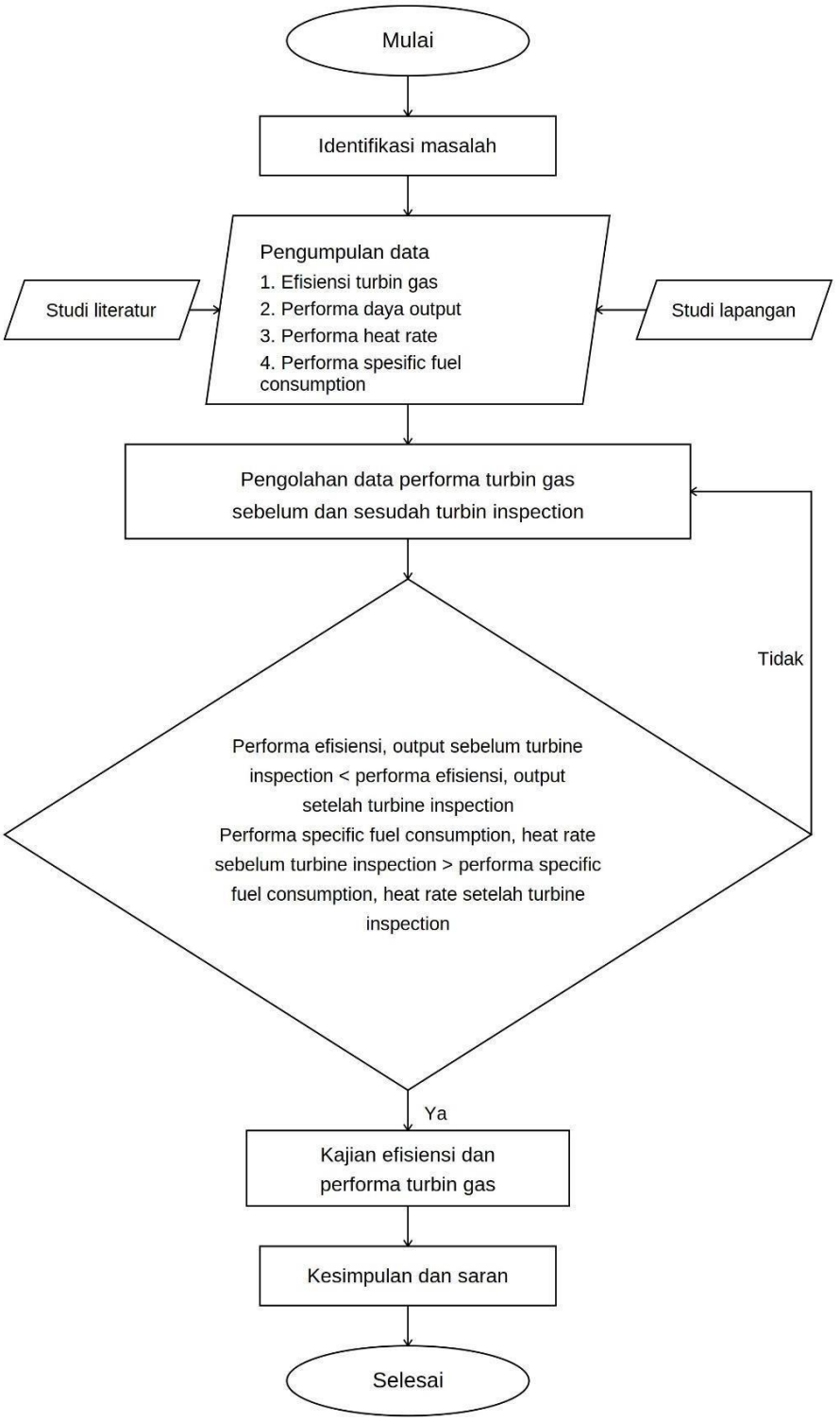
berdasarkan analisis performa turbin gas pada berbagai sistem pembangkit listrik, sehingga memberikan gambaran umum mengenai pengaruh degradasi komponen terhadap kinerja turbin gas (Kurz & Brun, 2021).

Penelitian oleh Prasetiyo et al. (2022) yang dilakukan pada unit 2 PLTGU di Indonesia menunjukkan bahwa komponen pada *combustion section*, seperti *fuel nozzle*, *combustion liner*, dan *transition piece*, mengalami penurunan performa akibat deposit karbon dan paparan temperatur tinggi. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan efisiensi pembakaran setelah dilakukan pembersihan dan inspeksi komponen, di mana pembakaran menjadi lebih stabil dan kehilangan energi akibat deposit dapat dikurangi secara signifikan.

Selanjutnya, penelitian oleh Purba dan Yuwana (2024) yang dilakukan di PLTGU Tanjung Uncang, Batam menunjukkan bahwa kegiatan overhaul turbin gas yang merupakan bagian dari inspeksi menyeluruh mampu meningkatkan efisiensi termal sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat dari 48,6% menjadi 52,1% setelah dilakukan overhaul. Selain itu, konsumsi bahan bakar juga menjadi lebih efisien karena proses pembakaran berlangsung lebih optimal.

Selain itu, penelitian yang dilakukan di PLTGU Muara Karang, Jakarta menunjukkan bahwa performa turbin gas sangat dipengaruhi oleh kondisi komponen, khususnya pada bagian kompresor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah dilakukan perawatan dan inspeksi pada kompresor, efisiensi meningkat sekitar 2–3% akibat berkurangnya *fouling* dan peningkatan aliran udara masuk ke sistem pembakaran.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.9 Diagram Alir

(Sumber = Data Pribadi)