

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Relevan

Untuk membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini, perlu diperhatikan beberapa penelitian yang relevan sebagai penunjang penelitian adapun penelitian yang hampir sama ialah:

1. Penelitian yang relevan dilakukan oleh Achmad Naufal (2019) dengan judul ***“Analisis Termodinamika Performa Turbin Gas Sebelum dan Sesudah Major Inspection Overhaul di PLTG Unit GT1.2 OMU IP Cilegon ”*** bertujuan mengetahui performa turbin gas dengan menghitung dan menganalisa perubahan performa turbin gas dan hasil secara termodinamik setelah dilakukan pemeliharaan atau *overhaul*. Dapat dihasilkan peforma turbin gas 0.72% , kompresor 0.98%, siklus termal actual 1.06%. Dalam ruang bakar efisiensi tetap dalam kondisi 100%. Dan beberapa indikator menunjukkan penurunan nilai; *Air Fuel Ratio* 0.116%, *Back Work Ratio* aktual 0.98%, *Specific Fuel Consumption* aktual 0.004387%, *Heat rate* aktual 222.242 (Uni et al., 2019).
2. Penelitian yang relevan dilakukan oleh Nabilah Mahfuzah (2022) dengan judul ***“ Perawatan Turbin Sebelum dan Sesudah Combustion Inspection di Pembangkit Listrik Tenaga Gas”*** Membahas tentang inspeksi ruang bakar yang diaplikasikan pada turbin gas PLTG memiliki dampak positif terhadap kinerja PLTG. Berdasarkan data hasil operasi dan hasil perhitungan mengenai analisis kinerja PLTG sebelum dan sesudah kegiatan *combustion inspection*, terjadi peningkatan daya oleh komponen kompresor 1605,9 kW, kemudian komponen turbin diperoleh daya sebesar 25862,16 kW menghasilkan peningkatan daya netto 24306,27 kW. Dan bahan bakar terdapat penurunan peforma sebesar 0.0196 kg/kWh, dan penurunan *Back Work Rasio* 0.02%. efisiensi turbin meningkat 5,19% efisiensi kompresor meningkat 10.25% dan siklus turbin gas meningkat secara drastis 73%.dapat disimpulkan efisiensi meningkat akibat pemakaian bahan bakar yang efektif

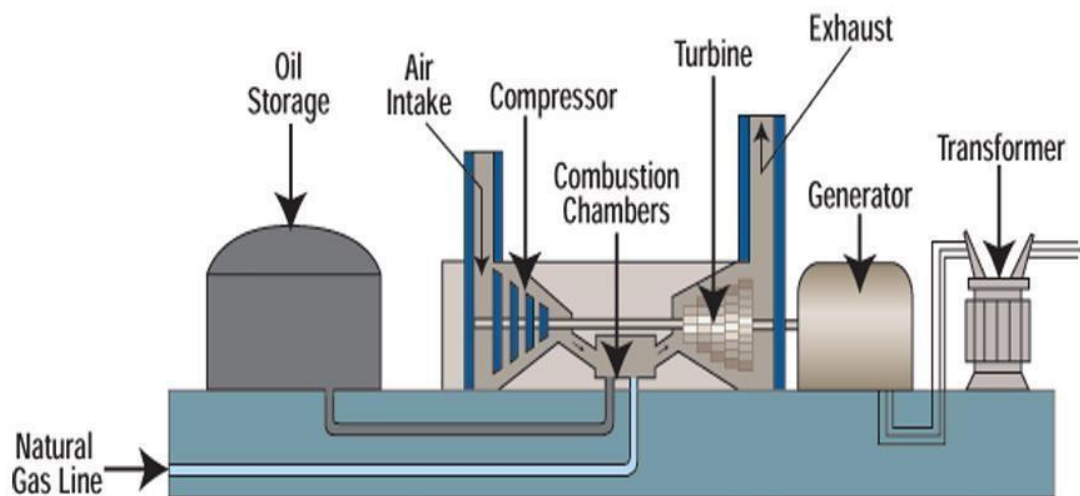
dengan campuran udara panas yang mempengaruhi peningkatan pembakaran untuk menghasilkan gas panas terhadap konsumsi pemakaian turbin.

3. Penelitian yang relevan dilakukan oleh Sunarwo (2016) dengan judul ***“Analisa Efisiensi Turbin Gas Unit 1 Sebelum dan Sesudah Overhaul Combuster Inspection Di PT PLN(Persero) sektor pembangkit PLTGU Cilegon ”*** Membahas tentang hasil *overhaul* pada turbin gas dapat meningkatkan efisiensi dengan menurunkan kalori penggunaan bahan bakar, sehingga menghasilkan energi yang lebih efisien. Selanjutnya dapat dianalisis efisiensi turbin gas unit 1 setelah dilakukan *overhaul* sebelum dan sesudah mendapatkan hasil peningkatan efisiensi turbin, peningkatan efisiensi thermal, penurunan *heat rate*, dan penurunan konsumsi bahan bakar setelah kegiatan *overhaul*. Proses perawatan turbin sangat penting dilakukan karena dapat menjaga performa komponen dan umur kehandalan pemakaian. Dimana beban turbin yang besar akan meningkatkan efisiensi thermal yang efektif terhadap peningkatan efisiensi bahan bakar pada *combustor* (ruang bakar).
4. Penelitian yang relevan dilakukan oleh Rafi Prasetyo (2021) dengan judul ***“Maintenance on the Combustion Section Gas Turbine Unit 2”*** membahas tentang bagaimana cara melakukan *maintenance* pada turbin gas dan pengaruh dilakukannya *maintenance* secara berkala guna menjaga efisiensi yang dimana perawatan dilakukan sesuai *time based* seperti *combustion inspection* 8.000 jam unit beroperasi dengan pemeriksaan pada *fuel nozzle*, *combustor* basket, transition pieces dan komponen lain yang ada pada *combustor chamber*. Ketika beroperasi selama 40.000 jam maka dilakukan kembali *combustion inspection* dengan pemeriksaan yang sama. Proses ini dilakukan agar meningkatkan umur setiap komponen serta mencegah terjadinya kerusakan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan turbin sebagai penggerak utama dan gas sebagai fluida kerjanya. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) terdiri atas komponen utama dan komponen bantu. Setiap komponen memiliki peran, yang mewakili setiap tahapan proses dari siklus produksi energi listrik. Gangguan pada salah satu komponen akan berakibat pada keseluruhan sistem. Turbin gas dituntut untuk bekerja dengan temperatur yang tinggi dalam jangka waktu yang lama. Kondisi tersebut tidak seharusnya dibiarkan terus berlanjut, karena seiring waktu kemampuan turbin gas akan terus menurun. Performansi tersebut dapat dikembalikan ke kondisi semula dengan dilakukan pemeliharaan pada komponen turbin gas. Pada sisi lain PLTG merupakan pembangkit yang sederhana tidak memerlukan tempat yang luas serta pembangunan yang lama. Perhitungan efisiensi thermal turbin gas berdasarkan pada media udara atau energi thermal sebagai fluida kerja. (Gusni et al., 2017). Adapun gambar skema PLTG dapat dilihat pada gambar 2.1.

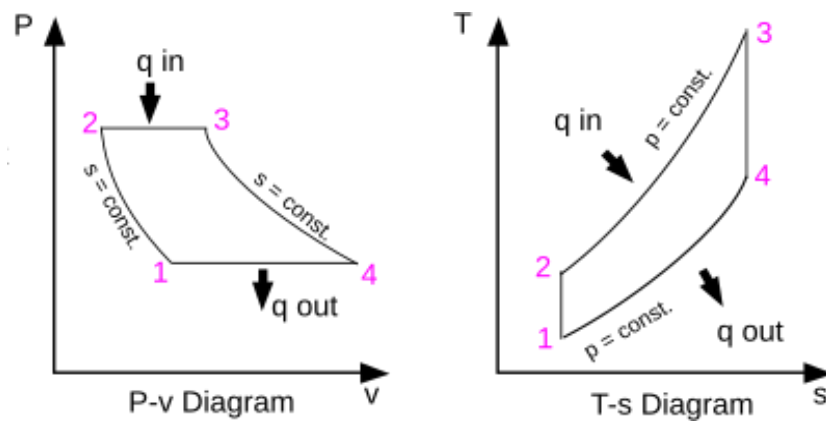


Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas.

Sumber: https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw-image%3A%2F%2F2Fd8b4149850de68bf422721dd71176106b22304df791e930b48c41becddd90c37&tbnid=v2jeUJgUtNhM9M&vet=1&imgrefurl=https%3A%2F%2Fesuhartono.staff.telkomuniversity.ac.id%2Ffiles%2F2015%2F03%2FModul-5b-PLTG.pdf&docid=NE3XZH_VdRPo7M&w=684&h=274&hl=en-US&source=sh%2F%2Fim%2Fm5%2F4&kg=48a6a2610b1b4883

2.2.2 Siklus *Brayton*

Siklus *Brayton* adalah siklus gaya termodinamika atau sebuah konsep dasar untuk turbin gas yang ditemukan oleh George Brayton. Turbin gas secara termodinamika bekerja dengan siklus *brayton*. Sistem turbin gas pada siklus *brayton* dapat dilihat pada P-V diagram dan T-S diagram. Adapun gambar 2.2 dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.2 Diagram T-s dan P-v Siklus *Brayton*

Sumber : <https://share.google/kycX5OMp4UJx33UsN>

Siklus *Brayton* adalah siklus yang digunakan dalam turbin gas, karena itu ada beberapa urutan proses siklus *Brayton* sebagai berikut:

1. Proses 1-2 Kompresi *Isentropic*: Kompresor mengkompresi udara dari lingkungan. Proses ini biasanya dilakukan secara *isentropic* (tanpa kerugian) untuk meningkatkan tekanan udara. Tekanan juga meningkatkan suhu. Pada diagram siklus, garis diagonal ke atas ke kanan menunjukkan proses ini.
2. Proses 2-3: pemanasan *isobaric*: didalam pembakar, udara yang telah dikompresi dipanaskan dalam tekanan konstan. Untuk meningkatkan suhu aliran gas, bahan bakar disemprotkan ke dalam aliran udara yang dikompresi kemudian dibakar. Energi panas dilepaskan ke aliran udara dalam proses ini. Pada diagram siklus, garis horizontal ke kanan menunjukkan proses ini.

3. Proses 3-4: Udara panas dan bertekanan tinggi yang dihasilkan dari ruang bakar diarahkan ke turbin. Kipas berputar melewati udara, mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Karena udara secara adiabatik mengalami penurunan tekanan dan suhu, proses ini juga dikenal sebagai ekspansi isentropik. Ekspansi isentropik berarti proses ini terjadi secara *reversible* (tanpa gesekan atau kehilangan energi akibat ketidakaturan), sehingga entropi udara tetap konstan.
4. Proses 4-1 : Setelah udara melewati turbin, energi yang menggerakkan turbin gas dibuang ke udara luar. Saat sebagian besar energinya telah hilang bahwa udara yang keluar dari turbin telah kehilangan sebagian besar energi kinetik dan panasnya, karena energi tersebut telah digunakan untuk menggerakkan turbin. Suhu dan tekanan udara lebih rendah dari pada saat masuk kedalam siklus.

2.2.3 Keunggulan dan kekurangan PLTG

Umumnya setiap pembangkit listrik terdapat kelebihan dan kekurangan tetapi pada PLTG memiliki lebih sedikit kekurangan dari pada pembangkit jenis lainnya. Sehingga adapun beberapa yang menjadi keunggulan dan kelemahan PLTG (Gusni et al., 2017) sebagai berikut :

- a. Keunggulan tersebut antara lain:
 1. Gas panas dapat dimanfaatkan kembali jika dikombinasikan dengan ketel uap atau disebut *combine cycle* .
 2. Pembangunan fasilitas yang peralatan sangat sederhana dari pada pembangkit termal lainnya.
 3. Bahan bakar yang sangat sederhana
- b. Kelemahan tersebut antara lain:
 1. Peningkatan biaya operasi yang sangat mahal
 2. Memerlukan lahan yang sangat luas dan tempat tertentu.
 3. Peralatan yang dibutuhkan sangat mahal dan terbatas

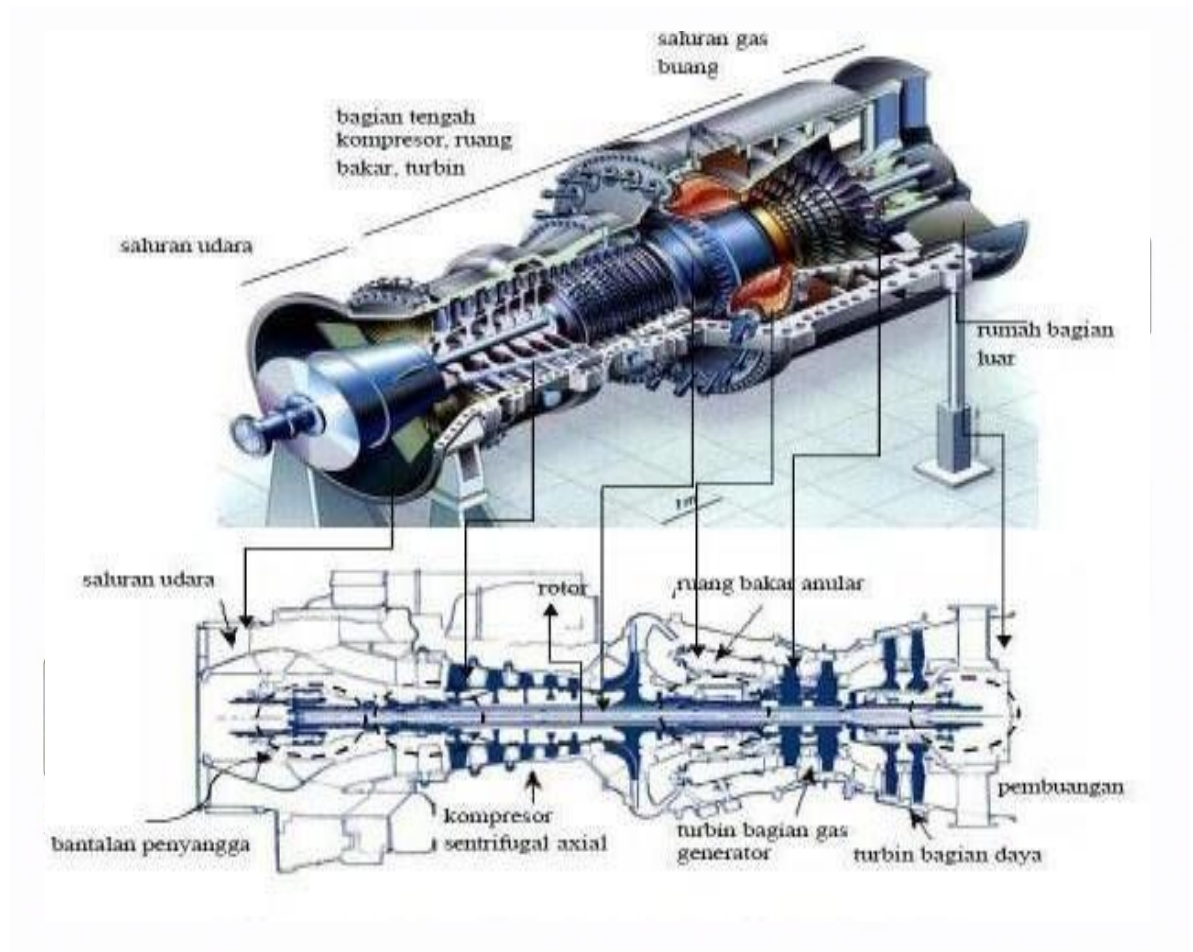
2.2.4 Prinsip Kerja PLTG

Pembangkit Listrik Tenaga Gas merupakan salah satu pembangkit yang menggunakan gas sebagai bahan bakar utamanya adapun beberapa prinsip kerja PLTG (Febri et al., 2024) sebagai berikut :

1. Udara atmosfer ditekan melalui kompresor untuk membantu proses pembakaran di dalam ruang bakar yang dicampur dengan bahan bakar seperti gas alam yang dikompresi oleh udara bertekanan tinggi sehingga menghasilkan gas panas yang bertekanan tinggi.
2. Gas panas hasil pembakaran mengalir ke turbin gas untuk memutar komponen turbin yang menghasilkan energi mekanik dari gas yang menyebabkan turbin berputar dan putaran ini diubah menjadi energi listrik.
3. Turbin yang berputar terhubung dengan generator listrik untuk menghasilkan energi listrik dari hasil energi mekanik turbin. Generator berputar agar menghasilkan listrik dari induksi elektromagnetik yang dihasilkan.
4. Transformator distribusi mengubah tegangan listrik dari generator menjadi tegangan yang sesuai untuk didistribusikan ke jaringan listrik.
5. Gas panas sisa turbin gas yang dihasilkan akan dibuang ke udara luar dan juga bisa dimanfaatkan kembali ketika dikombinasikan dengan gabungan dari pembangkit gas dan uap.

2.2.5 Komponen Utama Instalasi PLTG

Secara umum pembangkit listrik tenaga gas terdapat beberapa peralatan utama yang bertujuan untuk menunjang pengoperasian PLTG antara lain seperti kompresor, ruang bakar (*chamber*), turbin gas, generator. Yang pada sistem, semua alat saling berhubungan satu sama lain agar dapat menghasilkan listrik. (Syammary et al, 2020) Adapun gambar komponen utama instalasi PLTG dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Komponen Utama Instalasi PLTG

2.2.5.1 Kompresor

Kompresor adalah sebuah alat mekanis yang digunakan untuk meningkatkan tekanan udara hisap atau disebut udara atmosfer. Fluida dikompresi sehingga menghasilkan tekanan yang tinggi untuk membantu proses pembakaran didalam chamber. Setiap kompresor terdapat 14 tingkat pada bagian *inlet* terdapat IGV (*Inlet Gate Vane*) yang bekerja untuk mengatur suplai udara masuk kompresor. (Mustofa et al., 2021) Adapun kompresor dapat dilihat pada gambar 2.4 di bawah ini.

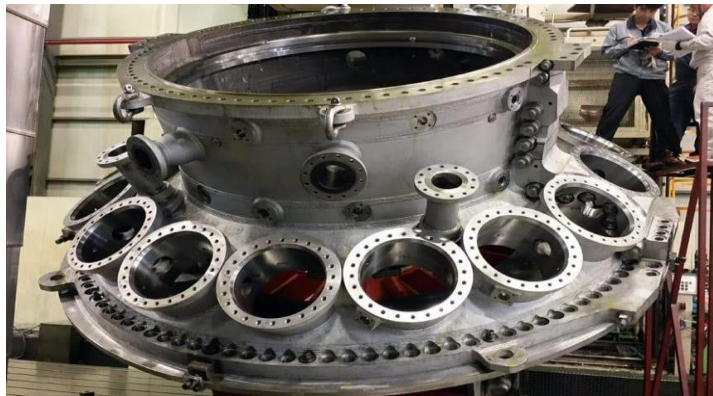


Gambar 2.4 Kompresor

Sumber: PT PLN INDONESIA POWER UBP Priok

2.2.5.2 Ruang Bakar (*Combustor Chamber*)

Combustor adalah bagian tempat terjadinya pembakaran udara. Proses pembakaran di ruang bakar ini berbeda dengan yang terjadi pada mesin piston (*reciprocating engine*). Dalam sistem turbin pembakaran yang Udara disusun secara simetris di sekitar kompresor untuk mengurangi gangguan selama proses pembakaran. Sekitar 80% hingga 90% dari udara yang masuk digunakan di seluruh bagian mesin. Struktur ruang bakar yang dibentuk menyalurkan gas panas dihasilkan dari pembakaran menuju turbin. (Kurnia et al.,2024) adapun gambar 2.5 terdapat di bawah ini.



Gambar 2.5 Combustor

Sumber: <https://share.google/MyQdrdR6GK4viPLHB>

2.2.5.3 Turbin Gas

Turbin gas adalah jenis mesin pembangkit tenaga gas yang menghasilkan energi mekanis yang bertemperatur tinggi berkisar 1400-1500°C. Proses ini dimulai dari pembakaran bahan bakar didalam ruang bakar. Dan panas akan dimanfaatkan untuk menggerakkan bilah turbin dan menggerakkan generator listrik. Efisiensi turbin gas lebih tinggi dari turbin uap karena beban yang dihasilkan lebih besar disisi lain pasokan energi sangat cepat dan gas buang dapat dimanfaatkan kembali melalui siklus kombinasi pembangkit.(Naryono et al.,2013) Adapun gambar turbin dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Turbin Gas

Generator merupakan perangkat elektromekanis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Pada umumnya generator terdiri atas rotor dan stator. Yang dimaksud dengan rotor yaitu bagian yang terhubung dengan sumber energi mekanis yaitu turbin uap atau gas. Sedangkan stator adalah bagian yang dikelilingi oleh kawat pada rotor. Sehingga medan magnet ini memotong gulungan kawat pada stator. Hal ini mengakibatkan terjadinya gaya elektromotif induksi pada gulungan kawat stator. Maka arus Listrik akan mengalir melalui gulungan kawat stator dan energi mekanis diubah menjadi energi listrik.(Ramadhan et al.,2021) Adapun gambar generator dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah ini.



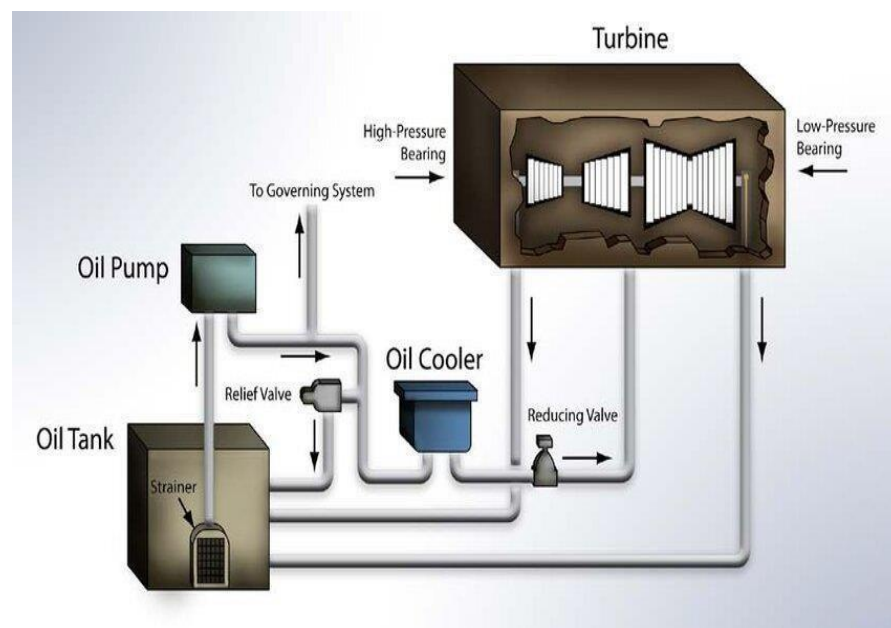
Gambar 2.7 Generator Listrik

Sumber:https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fenergie.ch%2Fcontent%2Fimages%2Fsize%2Fw2000%2F2020%2F01%2FP1030471.JPG&tbid=WA593uDVAAnHGdM&vet=1&imgrefurl=https%3A%2F%2Fenergie.ch%2Fsynchrongenerator%2F&docid=NCO2hFml_2IlyM&w=2000&h=1333&hl=en-US&source=sh%2Fx%2Fim%2Fm5%2F4&kgs=d573c9ce433180d3

2.2.6 Komponen Pendukung Turbin Gas

1. Lube Oil System

Lube oil sistem berperan untuk mendukung sistem yang dapat bergerak untuk melumasi semua komponen operasi turbin gas dengan sistem *continue* atau secara terus menerus yang dibantu oleh *make-up water* sebagai media pendingin pelumas agar pelumas dapat digunakan lagi. Adapun *lube oil sistem* terdiri sebagai berikut:



Gambar 2.8 Lube Oil System

Sumber: Unit Jawa 2 PT PLN Indonesia

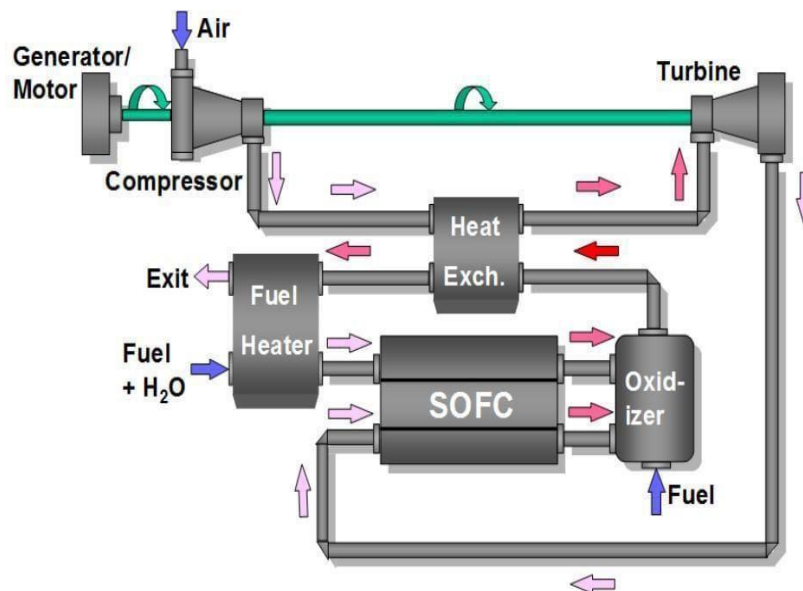
Power Adapun *lube oil sistem* terdiri sebagai berikut:

- Oil Reservoir Tank* adalah bagian dari tempat penyimpanan minyak pelumas yang bisa menampung minyak untuk memastikan cukup pada semua bagian komponen utama turbin gas.
- Sistem Pengukur Pelumas, bagian ini difungsikan untuk menjaga kuantitas pelumasan yang disirkulasikan serta mengontrol minyak pelumas agar cukup untuk bekerja dengan optimal.
- Filter, bagian ini biasanya berguna untuk menyaring kotoran yang terkandung didalam minyak pada pelumas turbin agar tidak mengganggu sistem kerja turbin pada saat beroperasi dan menjaga kebersihan seluruh sistem di pelumasan.

- d. Pompa, alat ini berfungsi untuk memindahkan fluida gas melalui sistem komponen yang membutuhkan pelumas dari tangki minyak dan memiliki banyak jenis pompa terdapat pada sistem *lube oil system* berdasarkan fungsi masing-masing.
- e. Pipa, alat ini mendistribusikan pelumas yang terhubung pada setiap komponen turbin gas baik pada komponen instrumen maupun komponen pendukung turbin .
- f. Katup, sistem ini mengontrol minyak melalui pipa pipa yg terhubung agar aliran dan tekanan seimbang berdasarkan kebutuhan mesin turbin.

2. Fuel Gas System

Bahan bakar berbasis gas yang bertekanan dan temperature tinggi yang dibantu sistem kompresi berdasarkan permintaan beban pada sistem turbin gas disisi lain sistem ini dilengkapi *drum knock out* sebagai pemisah campuran udara biasa dan gas sebelum menuju pembakaran. Adapun gambar *fuel gas system* dapat dilihat pada gambar 2.9.

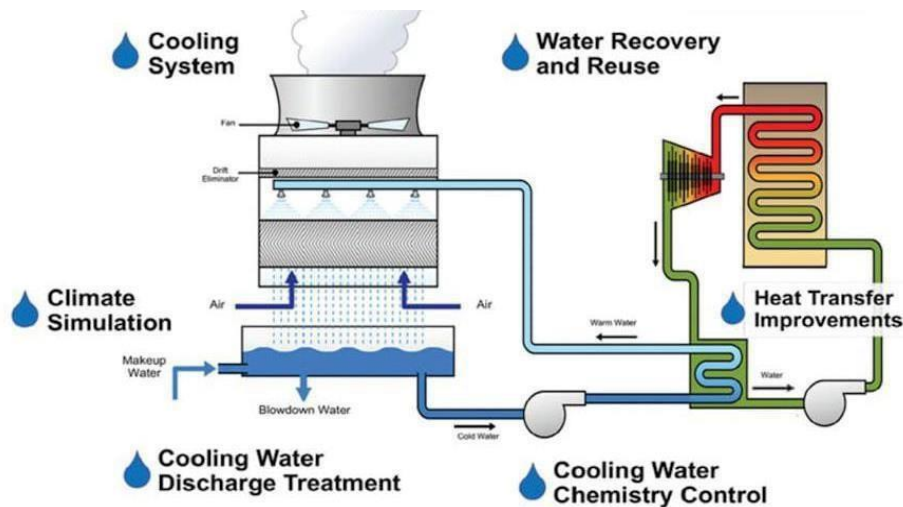


Gambar 2.9 Fuel Gas System

Sumber: Unit Jawa 2 PT PLN Indonesia Power

3. Cooling Water System

Cooling water system berfungsi sebagai peralatan pendukung turbin gas sebagai pendingin pada sistem pelumas turbin gas dimana sumber pendingin berasal dari air laut dinetralsir menjadi *service water* yang masih mengandung logam, kemudian air diproses lagi menjadi *make-up water* atau air yang sudah steril yang tidak mengandung air yang bersifat logam dan non-logam kemudian air tersebut di injeksi ke *cooling water tank* untuk mendinginkan keseluruhan sistem pelumas turbin gas secara tertutup dan air akan didinginkan kembali dengan alat penunjang dinamakan *radiator close cooling water*. Adapun gambar *cooling water system* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Cooling Water System

Sumber: Unit Jawa 2 PT PLN Indonesia Power

2.2.7 Pemeliharaan PLTG

1. *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance merupakan perawatan yang dilakukan pada pembangkitan terhadap setiap komponen utama maupun pendukung guna untuk mencegah terjadinya kerusakan kecil maupun fatal (Rafi et al., 2021).

2. *Predictive Maintenance*

Pemeliharaan yang dilakukan secara prediksi dan periodik waktu pelaksanaan perawatan. Hal ini dilakukan untuk menjaga kondisi komponen mesin pembangkit guna menjaga efektivitas performa peralatan dengan baik dan menjaga *lifetime* dari sistem komponen PLTG (Rafi, et al.,2021).

3. *Hot Gas Path Inspection*

Pemeliharaan ini dilakukan pada bagian area unit yang memproduksi gas panas yang ada pada ruang bakar (*combustor*) meliputi *nozzle* bahan bakar , saluran udara, dan *fire flame*.(Wireman, 2008).

4. *Major Inspection*

Inspeksi ini mencakup pemeriksaan semua komponen sambungan besar (*major flange to flange*) dan dilakukan setelah 48.000 jam operasi. Inspeksi ini juga meliputi *combustion inspection* (CI) dan *hot gas path inspection* (HGPI). Selain itu, pemeriksaan tambahan melibatkan deteksi retakan dan erosi pada *casing*, serta penilaian jarak, retakan, goresan, pembengkokan, dan *warpage* pada sudu rotor dan stator. Kompresor dan saluran masuk (*inlet*) diperiksa untuk erosi, korosi, kebocoran, dan kotoran. *Bearing* dan *seals* diperiksa untuk memastikan ukuran dan jaraknya sesuai dengan spesifikasi asli. (Saudi Aramco, et al.2024).

5. *Combustion Inspection*

Pemeriksaan ini juga melibatkan bagian utama komponen seperti ruang bakar dan turbin gas yang dilakukan 2 tahun setelah jam operasi. Pemeriksaan meliputi *nozzle* ruang bakar , 17 stage combustor , flame , rotor turbin, poros turbin, blade turbin dan bearing berguna untuk mengetahui kemampuan dan kerusakan yang dialami pada kegiatan CI tersebut.

2.2.8 Spesifikasi Turbin Gas

Terdapat spesifikasi turbin gas yang memiliki jenis aspek dan keterangan spesifikasinya pada tabel 2.1 di bawah ini:

Tabel 2.1 Spesifikasi Turbin Gas

Aspek Teknis		Keterangan
Manufaktur		Mitsubishi Hitachi Power System, LTD
Tipe		Open Cycle Single Shaft M701F4
Rated Speed		3000 rpm
Rated Power		301.500 kW
Frekuensi		50 Hz
Jumlah Tingkatan Kompresor		17 Stages Axial Compressor
Jumlah Ruang Bakar		20 buah tipe multi can-annular
Pendingin Ruang Bakar		Udara pendingin
Jumlah Tingkatan Turbin		4 stages pendingin udara
Dimensi		14.3 m x 5.8 m x 6.1 m
Emissions	Nox(NO ₂)	320 mg/m ³ (169 ppmvd)
	SO ₂	150 mg/m ³ (57 ppmvd)
	Particle	30 mg/m ³

Sumber : PT.PLN Indonesia Power UBP Priok

2.2.9 Perhitungan Entalpi dan Temperatur Ideal

1. Mencari nilai entalpi (h) menggunakan interpolasi (Amar et al., 2019) untuk penunjukkan persamaan 1 :

$$h_1 = \left(\frac{h_{atas} - h_{bawah}}{T_{atas} - T_{bawah}} \right) \times (T_1 - T_{bawah}) + h_{bawah} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

h = entalpi (kJ/kg)

h_1 = entalpi udara masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = entalpi udara keluar kompresor (kJ/kg)

T_1 = temperatur masuk (K)

T_2 = temperatur keluar (K)

2. Mencari nilai suhu udara ideal keluar kompresor untuk penunjukan persamaan 2 :

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

T_2 = suhu udara ideal keluar kompresor (K)

T_1 = suhu udara masuk kompresor (K)

P_2 = tekanan udara ideal keluar kompresor (bar)

P_1 = tekanan udara masuk kompresor (bar)

k = konstan (1,4)

3. Mencari *Pressure drop* untuk penunjukan persamaan 3 :

$$P_{drop} = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$P_3 = P_2 - (P_{drop} \times P_2)$$

Keterangan :

P_{drop} = pressure drop (100%)

P_3 = tekanan masuk turbin (bar)

P_2 = tekanan keluar kompresor (bar)

4. Mencari suhu turbin untuk penunjukan persamaan 4 :

$$T_3 = T_4 \times \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan :

T_3 = suhu udara masuk turbin (K)

T_4 = suhu udara keluar turbin (K)

P_3 = tekanan masuk turbin (bar)

P_4 = tekanan keluar turbin (bar)

k = konstan (dari engineering toolbox 1,3)

5. Mencari suhu ideal keluar turbin untuk penunjukan persamaan 5 :

$$T_4 = T_3 \times \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

T_4 = suhu ideal keluar turbin (K)

T_3 = suhu udara masuk turbin (K)

P_1 = tekanan udara masuk kompresor (bar)

P_2 = tekanan udara keluar kompresor (bar)

k = konstan (1,4)

2.2.10 Laju Aliran Bahan Bakar, *Air Fuel Ratio*, Laju Aliran Udara

1. Mencari nilai Laju aliran bahan bakar (Syammary,et al., 2020) untuk penunjukan persamaan 6 :

$$\dot{m}_f = Q_f \times p_f \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan :

$\dot{m}_f$ = laju aliran bahan bakar (kg/s)

Q_f = laju aliran volumetrik bahan bakar (m^3/s)

p_f = massa jenis bahan bakar (kg/m)

2. Mencari Nilai *Air Fuel Ratio* untuk penunjukkan persamaan 7 :

Air Fuel Ratio merupakan perbandingan antara massa udara yang dihisap ke dalam sistem dan massa bahan bakar yang digunakan untuk pembakaran di ruang bakar. AFR memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi termal dan kinerja turbin gas. AFR menentukan seberapa banyak udara yang digunakan untuk membakar sejumlah bahan bakar tertentu. Pembakaran yang efisien dan stabil sangat bergantung pada AFR. Jika campuran terlalu kaya, pembakaran mungkin tidak lengkap, menghasilkan emisi yang lebih tinggi dan potensi pengotoran komponen. Jika campuran terlalu kurus (*lean*) pembakaran bisa menjadi tidak stabil atau menghasilkan suhu yang lebih tinggi, yang dapat merusak turbin.

$$\frac{A}{F} = \frac{\left[\left(\frac{W_{gen}}{\eta_{gen}}\right) + mech\ losses - (\dot{m}_f \times (h_3 - h_4))\right]}{\left[(\dot{m}_f \times (h_3 - h_4)) - (\dot{m}_f \times (h_2 - h_1))\right]} \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan :

$\frac{A}{F}$ = *Air fuel ratio* (%)

W_{gen} = kerja generator (MW)

η_{gen} = efisiensi generator (%)

mech Losses = kerugian energi yang terjadi pada komponen (kW)

$\dot{m}_f$ = laju aliran bahan bakar (kg/s)

h_3 = Entalpi gas masuk turbin (kJ/s)

h_4 = Entalpi gas keluar turbin (kJ/s)

h_2 = Entalpi udara keluar kompresor (kJ/s)

h_1 = Entalpi udara masuk kompresor (kJ/kg)

3. Mencari nilai Laju Aliran udara untuk penunjukkan persamaan 8 :

$$\dot{m}_a = \frac{A}{F} \times \dot{m}_f \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan :

$\dot{m}_a$ = laju aliran udara (kg/s)

$\frac{A}{F}$ = Air fuel ratio (%)

$\dot{m}_f$ = laju aliran bahan bakar (kg/s)

2.2.11 Perhitungan Kerja Komponen PLTG

1. Compressor

Udara dikompresi oleh kompresor, menghasilkan udara bertekanan tinggi yang keluar dari kompresor. Namun, efisiensi kompresor akan menurun, sehingga membutuhkan lebih banyak kerja (Achmad, et al., 2019). Oleh karena itu, untuk penunjukan persamaan 9 :

$$\dot{W}_C = \dot{m}_a \times (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan :

$\dot{W}_C$ = kerja kompresor aktual (kJ/s)

$\dot{m}_a$ = laju aliran massa udara (kg/s)

h_1 = entalpi udara inlet kompresor (kJ/kg)

h_2 = entalpi udara output kompresor (kJ/kg)

n_c = efisiensi kompresor (%)

2. Combustor Chamber

Dalam proses pembakaran, tekanan menurun akibat gesekan panas dari komponen-komponen dalam ruang bakar. Panas yang dihasilkan dari proses

pembakaran ini dapat dihitung menggunakan persamaan 10:

$$Q_{in} = \dot{m}_f \times LHV \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

Q_{in} = Panas pada saat pembakaran diruang bakar (kJ/s)

$\dot{m}_f$ = Laju Aliran massa bahan bakar (kJ/S)

LHV = Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

3. Turbin Gas

Selama proses ekspansi, terjadi gesekan antara gas hasil pembakaran dengan sudu-sudu turbin. Akibatnya, suhu gas yang keluar dari turbin menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan gas ideal atau isentropis (Syammary, et al., 2020). Nilai kerja dari turbin dapat dihitung menggunakan persamaan 11 :

$$\dot{w}_t = (\dot{m}_a - \dot{m}_f) \times (h_3 - h_4) \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan :

$\dot{w}_t$ = Kerja gas turbin actual (kJ/s)

$\dot{m}_a$ = Laju aliran massa udara (kg/s)

$\dot{m}_f$ = Laju aliras massa fuel (kg/s)

h_3 = Entalpi gas masuk turbin (kJ/s)

h_4 = Entalpi gas keluar turbin (kJ/s)

2.2.12 *Specific Fuel Consumption* dan *Back Work Ratio*

1. *Specific Fuel Consumption*

Specific Fuel Consumption (SFC) merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan (dalam berat) untuk menghasilkan satu unit daya dalam satu satuan waktu. Pada mesin piston SFC merupakan rasio antara massa bahan bakar dan daya poros tenaga kuda. Sedangkan pada mesin turbin gas, SFC adalah rasio antara massa bahan bakar dan dorongan yang dihasilkan. Kondisi optimal tercapai saat nilai SFC berada pada titik rendah. Nilai SFC cenderung menurun saat pada ketinggian dengan suhu

yang dingin, karena beberapa faktor utama seperti efisiensi termal meningkat, densitas udara yang lebih rendah, dan optimasi pembakaran.

$$SFC = \frac{\dot{m}_{\text{bahan bakar}}}{W_{\text{netto}}} \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan :

SFC = *specific fuel consumption* (L/kWh)

$\dot{m}_f$ = laju aliran massa bahan bakar (kg/jam)

W_{netto} = selisih daya (MW)

2. Back Work Ratio

Back Work Rasio dalam siklus *brayton* adalah rasio antara kerja yang dibutuhkan oleh kompresor dan kerja yang dihasilkan oleh turbin. Secara sederhana, BWR mengukur seberapa besar bagian dari energi yang dihasilkan oleh turbin yang digunakan kembali untuk beroperasi. Pada siklus *brayton*, BWR biasanya memiliki nilai di bawah 1, karena hanya sebagian dari energi yang dihasilkan oleh turbin yang dibutuhkan untuk menjalankan kompresor. Semakin rendah BWR, semakin efisien siklus tersebut. Untuk penunjukan persamaan 13 :

$$BWR = \frac{W_c}{W_t} \dots\dots\dots(13)$$

Keterangan :

BWR = back work ratio (%)

W_c = kerja kompresor (MW)

W_t = kerja turbin (MW)

2.2.13 Perhitungan Efisiensi Komponen PLTG

1. Efisiensi Kompresor untuk menunjukkan persamaan 14 :

$$\eta_c = \frac{T_2 - T_1}{T_2 - T_1} \times 100\% \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan :

η_c = efisensi kompresor (100%)

T_2 = suhu ideal keluar kompresor (K)

T_1 = suhu masuk kompresor (K)

T_2 = suhu keluar kompresor (K)

2. Efisiensi Turbin Gas untuk penunjukkan persamaan 15:

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4} \times 100\% \dots\dots\dots (15)$$

Keterangan :

η_t = Efisiensi turbin gas (100%)

T_3 = Entalpi gas keluar turbin (kJ/s)

T_4 = Entalpi gas keluar turbin (kJ/s)

T_4 = Suhu ideal keluar turbin (K)

2.2.14 Perhitungan Efisiensi *Thermal* PLTG

Untuk penunjukan persamaan 16 :

$$\eta_{th} = \frac{WT_a - WT_c}{Q_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (16)$$

Siklus kerja turbin gas dinyatakan menggunakan siklus *brayton* dimana rumus efisiensi *thermal* dengan pendekatan entalpi sebagai berikut :

$$\eta_{th} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan :

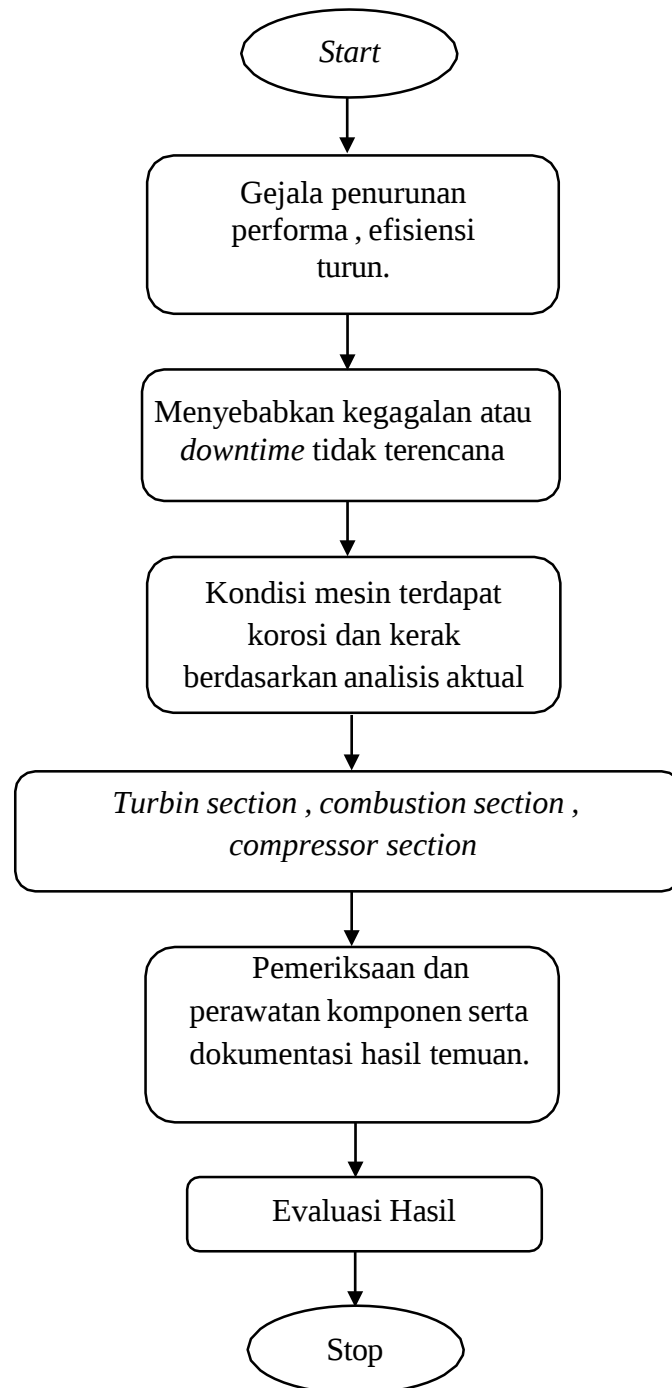
η_{th} = efisensi termal (100%)

WT_a = kerja turbin (kJ/s)

WT_c = kerja kompresor (kJ/s)

Q_{in} = nilai kalor masuk (kJ/s)

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2.11 Kerangka Pemikiran

Start titik pertama gejala penurunan performa menyebabkan efisiensi turun menyebabkan kegagalan atau *downtime* yang tidak terencana apabila terjadinya penundaan waktu ,berdasarkan analisis aktual terdapat mesin dengan kondisi tidak optimal seperti adanya kerak dan korosi dilakukan tiga unsur bagian pemeriksaan yaitu *turbine section*, *combustor section* dan *compressor section*. Setelah itu dilakukan eksekusi pemeliharaan meliputi pemeriksaan komponen, pembersihan kerak dan korosi terutama pada *combustor* yang memiliki titik area yang vital pada PLTG. Setelah itu dilakukan dokumentasi fenomena ketika adanya temuan yang diluar batas toleransi kondisi mesin sehingga jika ada terdapat kerusakan maka peralatan akan segera diganti sebagai prosedur pemeliharaan. Tentunya ada evaluasi setelah kegiatan pemeliharaan ini seperti kurangnya peralatan pemeliharaan yang mempengaruhi hasil semaksimal dilakukan *major inspection*.