

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Berikut beberapa referensi yang menjadi tinjauan pada penelitian yang berjudul Analisis Efisiensi Operasional Sistem GTG 2.2 pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Tambak Lorok, yaitu sebagai berikut:

Tahun 2014, Rahmat Kurniawan melakukan penelitian dengan judul “Analisa Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Sicanang Belawan”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya nilai efisiensi yang diperoleh dari PLTGU. Metode penelitiannya menggunakan perhitungan dengan pola kombinasi 1-1-1 dan 2-2-1. Hasilnya yaitu pada pola kombinasi 1-1-1 daya yang dihasilkan sebesar 108.361 kW dengan efisiensi rata-rata 29.50% dan pola kombinasi 2-2-1 mempunyai efisiensi rata-rata 30% dengan daya output sebesar 152.040 kW (Kurniawan & MulfiHazwi, 2014).

Penelitian yang berjudul “Analisis Eksergi pada Ruang Bakar pada PLTG Teluk Lembu 20 MW” yang dilakukan oleh Miswandi dan Awaludin Martin pada tahun 2015 bertujuan untuk mengetahui kinerja pembangkit listrik melalui eksergi pada kompresor dan turbin gas, serta mencari solusi agar dapat meningkatkan nilai efisiensi. Metode penelitian ini menerapkan studi kasus analisis eksergi dengan menghitung data yang telah diperoleh berdasarkan data operasional dari *control room*, lapangan, dan *manual book*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pemusnahan eksergi tertinggi terjadi di ruang bakar mencapai 21,98 MW (85,21%) dan sementara kompresor terendah 3,81 MW (14,79%) (Miswandi & Martin, 2015).

Selain itu, pada tahun 2018 Hendra K. S. beserta rekannya melakukan penelitian performansi pembangkit listrik dengan beban yang bervariasi. Penelitian ini berjudul “Analisis Performansi Pembangkit Listrik Tenaga Gas PT Indonesia Power Pamaran”. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis secara termodinamika terhadap efisiensi dan pemakaian bahan bakar spesifik (SFC).

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya nilai efisiensi setiap jamnya. Hasilnya menunjukkan variasi beban yang ada

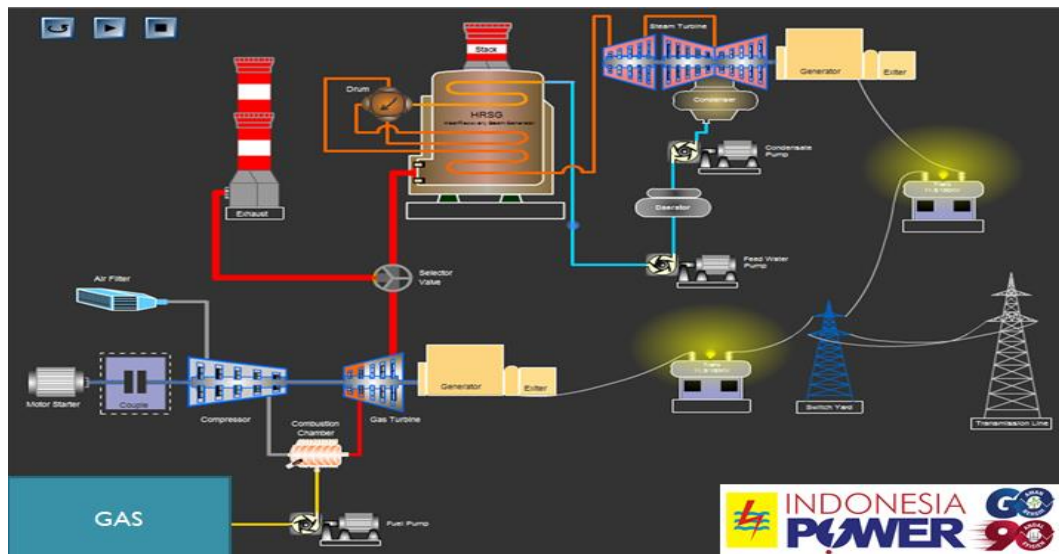
mempengaruhi nilai efisiensi serta penggunaan bahan bakar. Efisiensi tertinggi terdapat pada beban 44 MW sebesar 48.11% (K.S, Wirawan, & Sukadana, 2018).

Berbagai penelitian telah dilaksanakan dalam menganalisis besarnya nilai efisiensi suatu pembangkit listrik. Salah satu penelitian telah dilaksanakan oleh Hoseyn Sayyaadi dan Reza Mehrabipour pada tahun 2012 dengan judul penelitian “*Efficiency Enhancement of a Gas Turbine Cycle Using an Optimized Tubular Recuperative Heat Exchanger*” menggunakan metode yang digunakan yaitu fuzzy Bellman-Zadeh, LINMAP dan TOPSIS. Data yang diteliti yaitu daya sebesar 60 MW dengan efisiensi yang diperoleh yaitu sebesar 26% (Sayyaadi & Mehrabipour, 2012).

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)**

Secara umum proses produksi pada PLTGU merupakan gabungan dari PLTG dan PLTU. Selain itu, PLTGU juga dibagi menjadi dua siklus, yaitu siklus terbuka (*open cycle*), dimana pada siklus ini gas buang dari turbin gas pada GTG langsung dibuang ke udara melalui cerobong *exhaust* dan siklus tertutup (*combine cycle*), yang memanfaatkan kembali gas buang dari turbin gas pada GTG untuk memanaskan air yang berada pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*).



Gambar 2. 1 Siklus PLTGU (Sumber: PT Indonesia Power)

Siklus PLTGU secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada proses pembangkitan listrik pada *Gas Turbine Generator (GTG)*, *motor cranking* digunakan sebagai pemutar awal saat turbin belum menghasilkan tenaga dengan menggunakan energi listrik dari jaringan listrik. Motor ini berfungsi untuk memutar *compressor* yang digunakan untuk menghisap udara luar yang selanjutnya akan diubah menjadi udara berpartikel (*atomizing*) untuk proses pembakaran dan pendingin turbin.

Bahan bakar yang digunakan untuk proses pembakaran berupa gas yang dialirkan melalui pipa bawah laut menuju GCV/SRV yang diatur tekanannya, kemudian dipompa menuju *combustion chamber* dan dicampur dengan udara yang berasal dari *compressor*, secara bersamaan busi (*spark plug*) memercikan api agar proses pembakaran dapat berlangsung.

Gas yang dihasilkan pada proses pembakaran di *combustion chamber* ini digunakan sebagai penggerak turbin gas yang menghasilkan energi mekanik dan selanjutnya energi tersebut diubah menjadi energi listrik menggunakan generator, pada sistem GTG ini *output* dayanya berkisar 93 MW dengan tegangan outputnya 11,5 kV yang selanjutnya tegangan ini *distep up* menggunakan *transformator* menjadi 150kV dan disalurkan menuju saluran transmisi.

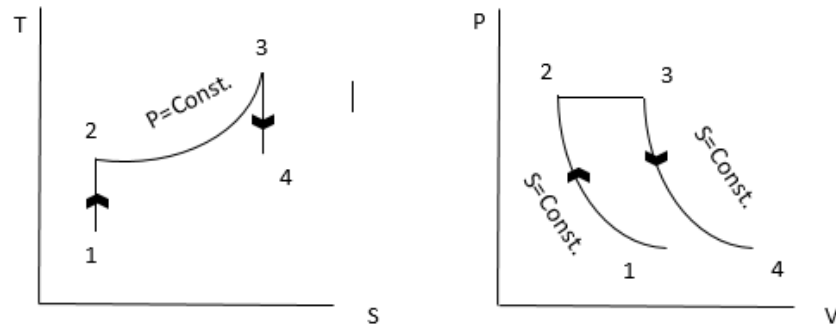
Sedangkan proses pembangkitan listrik pada *Steam Turbin Generator* (STG), proses penguapan airnya dibantu dengan gas hasil dari turbin gas pada GTG. Gas tersebut dialirkan terlebih dahulu melewati *dampers* menuju HRSG. Air yang digunakan berasal dari sisa uap dari turbin yang dikondensasikan pada *condenser*, tetapi air hasil kondensasi tersebut belum cukup digunakan untuk proses penguapan pada HRSG. Dibutuhkan sistem air penambah yang diperoleh dari hasil proses demineralisasi.

Proses demineralisasi tersebut berawal dari air laut yang dipompa dengan *sea water supply pump* menuju *multistage* untuk mengurangi kadar konduktivitasnya dari 70  $\mu\text{S}$  menjadi 10  $\mu\text{S}$  dengan cara memanskan air hingga menjadi uap dan mengubahnya kembali menjadi air, proses ini dilakukan  $\pm 20$  kali. Air tersebut kemudian dipompa menggunakan *distillate water pump* menuju *make up water tank*, air pada tank ini dapat digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Proses selanjutnya yaitu menurunkan kadar konduktivitas air menjadi dibawah 1  $\mu\text{S}$  dengan cara memompa air dari *make up water tank* menggunakan *make up water tank* menuju *poliser*. Pada *poliser* terjadi proses demineralisasi dan regenerasi, setelah itu air ditampung pada *demin water tank* dan dipompa menuju sisi *hot-well condensor* dengan *demin water pump*.

Air pada *condensor* tersebut dipompa menggunakan *condensate pump* menuju *deaerator* untuk memisahkan kandungan gas pada air, selanjutnya air yang sudah murni tersebut dipompa menuju HRSG menggunakan *feed water pump* untuk dipanaskan agar menghasilkan uap. Uap tersebut digunakan untuk memutar kedua turbin yaitu *Low Pressure (LP) Turbine* dan *High Pressure (HP) Turbine* untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik menggunakan generator. *Output* pada sistem STG berkisar 126 MW dengan tegangan 15 kV dan tegangan ini akan *distep up* menggunakan *transformator* menjadi 150 kV dan disalurkan menuju saluran transmisi.

### 2.2.2 Siklus *Bryton*

Siklus yang digunakan pada GTG dikenal dengan siklus *Bryton*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Diagram T-S dan P-V siklus Bryton (Moran & Shapiro, 2006)

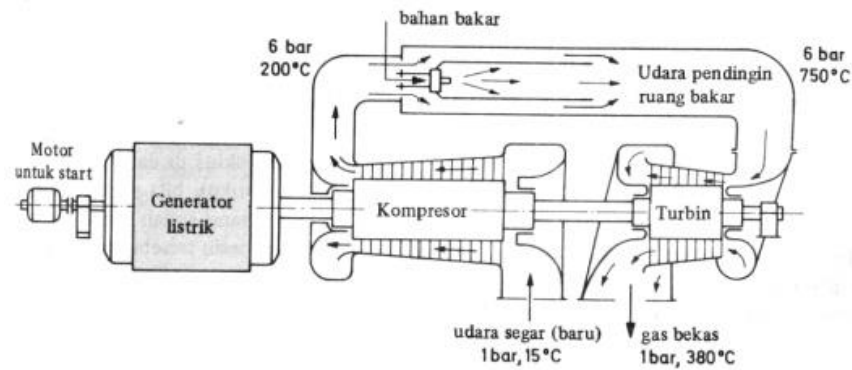
Terdiri dari 4 proses pada siklus ini, yaitu proses kompresi udara, pembakaran, ekspansi, dan pembuangan gas bekas.

1. Proses (1-2) yaitu proses kompresi udara oleh kompresor (*compression process*). Udara yang akan dikompresi dihisap menggunakan *air inlet* yang bertujuan untuk mengashilkan udara yang bertekanan.
2. Proses (2-3) yaitu proses pembakaran di dalam ruang bakar (*combustion process*). Udara yang telah dikompresi sebgiaan besar digunakan untuk proses pembakaran yang akan dicampur dengan bahan bakar berupa gas.
3. Proses (3-4) merupakan proses ekspansi gas di dalam turbin (*expantion process*). Udara yang telah dicampur dengan bahan bakar gas dialirkan untuk memutar turbin.
4. Proses (4-1) adalah proses pembuangan gas bekas (*exhaust process*).

### 2.2.3 Komponen pada GTG

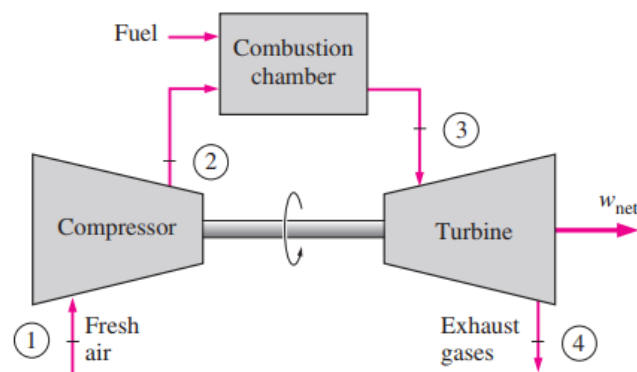
Turbin gas merupakan mesin penggerak energi yang bekerja dengan cara membakar bahan akar dalam api terbuka yang menghasilkan energi panas. Energi yang telah dihsilkan tersebut kemudian dialirkan menggunakan mesin ke perangkat keras menggunakan fluida kerja berupa udara. Proses yang terdapat pada turbin gas berupa pengambilan udara, kompresi, pemanasan, serta pembuangan yang dilakukan secara berurutan. (Pudjanarsa & Nursuhud, 2012)

Komponen dan susunan turbin gas sederhana secara jelas dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Turbin gas sederhana (Dietzel, 1996)

Berdasarkan klasifikasi sistem kerja berdasarkan siklusnya, GTG 2.2 pada PT Indonesia Power UP Semarang menggunakan siklus terbuka (*open cycle*). Proses dari siklus terbuka, udara yang diperoleh dari udara bebas dikompresi yang selanjutnya dialirkan menuju ruang bakar untuk proses pembakaran. Setelah itu, hasil pembakarannya berekspansi pada turbin dan gas sisa hasil ekspansi tersebut kemudian dibuang. Skema sistem turbin gas dapat dilihat pada Gambar 2.4. Proses yang dikembangkan oleh Bryton (1873).



Gambar 2. 4 Skema sistem turbin gas sederhana (Chengel & Boles, 2006)

Selain itu, turbin gas juga diklasifikasikan berdasarkan konstruksinya. GTG 2.2 menggunakan turbin gas berporos tunggal (*single shaft*) yang tersusun dari turbin yang memiliki tekanan tinggi dan rendah. Fungsi dari turbin gas bertekanan tinggi yaitu untuk mensuplai gas panas menuju turbin bertekanan rendah. Turbin bertekanan rendah digunakan untuk memutar generator listrik.

Berdasarkan arah aliran gasnya, turbin gas pada GTG 2.2 diklasifikasikan sebagai turbin aksial. Hal tersebut dikarenakan arah aliran fluidanya sejajar dengan poros turbin.

Komponen yang terdapat pada GTG dapat dikategorikan menjadi 2 bagian, yaitu komponen utama yang terdiri dari kompresor, ruang bakar, dan turbin. Selain itu terdapat komponen pendukung yang terbagi atas beberapa sistem, yaitu sistem permulaan, sistem pemindah daya, sistem pembakaran, sistem pelumasan dan sistem pelumasan.

### 2.2.3.1 Komponen Utama

#### 1. Kompresor

Kompresor adalah komponen pada GTG yang berfungsi meningkatkan tekanan udara. Udara tersebut diperoleh dari udara lingkungan yang dihisap melalui *air inlet*. Udara tersebut akan dikompresi pada tekanan tertentu lalu akan dialirkan ke *combustion chamber*. Hal tersebut bertujuan agar gas panas yang nantinya akan dihasilkan oleh *combustion chamber* memiliki pressure yang tinggi. Gambar kompresor dapat dilihat pada Gambar 2.5

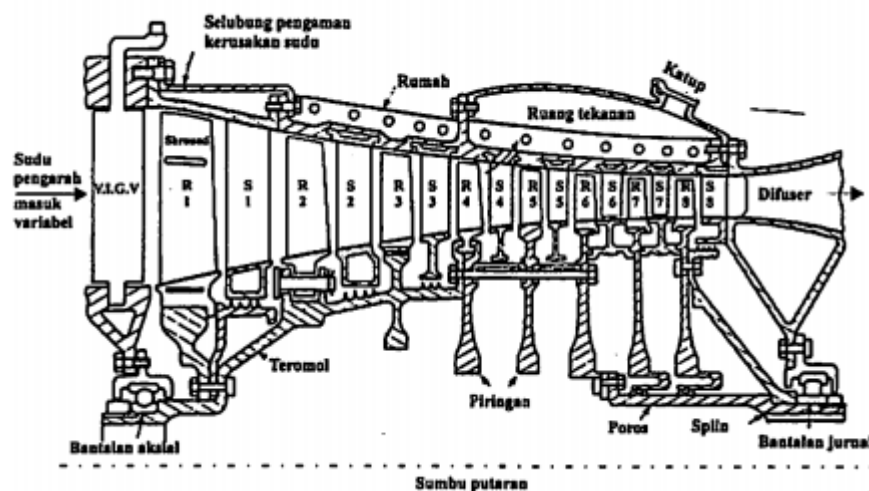


Gambar 2. 5 Kompresor pada GTG 2.2

Komponen utama pada bagian ini adalah *axial flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet air section* hingga bertekanan tinggi, sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya *output* turbin yang besar. Jenis kompresor yang digunakan adalah kompresor aksial 17 tingkat dengan rasio tekanan 10 *bar*, yang terdiri dari sudu pengarah masuk, rotor dan stator 17 tingkat

dan sudu pengarah keluar. Sudu-sudu rotor kompresor terdiri dari 4 bagian utama, yaitu:

- *Inlet casing* terletak pada ujung kompresor.
- *Forward casing* yang terdiri dari 4 tingkat pertama.
- *Aft casing* yang terdiri dari sudu kompresor tingkat 5 hingga 10.
- *Discharge casing* yaitu bagian akhir pada kompresor yang terdiri atas 7 tingkat.



Gambar 2. 6 Kompresor aksial (Cohen, 1991)

Nilai kerja pada kompresor dapat dihitung menggunakan rumus seperti dibawah ini:

- a. Menghitung kerja kompresor aktual ( $W_{ca}$ )

$$W_{ca} = \frac{\dot{m}_{ud} \cdot (h_2 - h_1)}{\eta_c} \dots \dots \dots (2.1)$$

- b. Menghitung efisiensi kompresor ( $\eta_c$ )

$$\eta_c = \frac{h'_2 - h_1}{h_2 - h_1} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana  $h'_2$  adalah nilai entalpi dari  $T'_2$  dihitung dengan rumus

$$T'_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (2.3)$$

## 2. Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Ruang bakar merupakan komponen tempat terjadinya proses pembakaran. Udara yang telah dikompres tersebut memiliki *pressure* yang tinggi akan dicampur



dengan bahan bakar gas dan terjadi proses pembakaran yang dibantu dengan percikan api dari busi (*spark plug*). Proses ini berfungsi untuk menambahkan nilai kalor pada gas. Ruang bakar pada GTG 2.2 dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2. 7 Ruang bakar pada GTG 2.2

Terdapat beberapa bagian pada instalasi ruang bakar, antara lain sebagai berikut:

- Ruang bakar pembakaran (*casing*) merupakan tempat seluruh proses pembakaran yang digunakan untuk mencampurkan udara yang telah dikompres dengan bahan bakar yang masuk.
  - Ruang bakar utama (*combustion liner*) berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran yang memiliki sirip sebagai jalur masuknya udara menuju *combustion chamber* serta untuk mendinginkan *combustion liner* sendiri.
  - Pematik nyala api (*spark plug*) berfungsi sebagai pematik api agar proses pembakaran dapat terjadi menggunakan arus listrik untuk menciptakan percikan api yang digunakan pada proses awal penyalaan turbin gas.
  - *Nozzle (injector)* digunakan untuk menyemprotkan bahan bakar gas pada *combustion liner* dan bercampur dengan udara.
- a. Menghitung nilai kalor masuk ( $Q_{in}$ )

$$Q_{in} = \dot{m}_{BB} \cdot NK_{BB} \dots \dots \dots (2.4)$$

b. Menghitung Laju Aliran Udara

$$\dot{m}_{ud} = \frac{Q_{in} - (\dot{m}_{BB} \cdot h_3)}{(h_3 - h_2)} \dots\dots\dots (2.5)$$

### 3. Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu mesin pengubah energi (*energy conversion machine*) yang memanfaatkan energi fluida berupa gas. Fungsi dari turbin gas adalah untuk menggerakkan beban seperti generator.

Secara sederhana turbin terdiri beberapa bagian, yaitu *rotor* merupakan bagian yang berputar terdapat poros (*shaft*) dengan sudu-sudu (*blade*) yang terpasang pada *rotor*. *Rotor* ini dapat bekerja karena adanya dorongan fluida atau dapat dikatakan berputar akibat reaksi dari fluida. Dapat dilihat pada Gambar 2.8 merupakan gambar turbin gas pada GTG 2.2



Gambar 2. 8 Turbin gas GTG 2.2

Terdapat beberapa komponen penyusun turbin gas ini, antara lain sebagai berikut:

- *Turbin rotor case* merupakan *casing* yang berfungsi untuk melindungi turbin.
- *First stage nozzle* digunakan sebagai pengarah gas panas menuju *first stage turbine wheel*.
- *First stage turbine wheel* digunakan untuk mengkonversi energi kinetik dari fluida berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik yaitu putaran *rotor*.

- *Second stage nozzle* digunakan sebagai pengatur fluida menuju *second stage turbine*.
- *Diafragma* berfungsi sebagai pemisah antara dua *turbine wheel*.
- *Second stage turbine* digunakan untuk memanfaatkan energi kinetik yang tinggi dari *first stage turbine* agar kecepatan *rotor* yang dihasilkan lebih besar.
- *Third stage nozzle* dan *second wheel spacer* berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke *third turbine wheel*.
- *Third turbine wheel* berfungsi untuk memanfaatkan sisa energi kinetik yang masih ada dari *second turbine wheel*.

a. Menghitung kerja turbin aktual ( $W_{ta}$ )

$$W_{ta} = (\dot{m}_{ud} + \dot{m}_{bb}) \cdot (h_3 - h_4) \cdot \eta_t \dots \dots \dots (2.6)$$

b. Menghitung efisiensi turbin ( $\eta_t$ )

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h'_4} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana  $h'_4$  adalah entalpi dari  $T'_4$ , nilai dicari dengan rumus berikut:

$$T'_4 = T_3 \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (2.8)$$

c. Menghitung efisiensi GTG (Efisiensi Thermal)

$$\eta_{th} = \frac{W_{ta} - W_{ca}}{\dot{m}_{BB} - NK_{BB}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.9)$$

### 2.2.3.2 Komponen Pendukung

#### 1. Sistem Permulaan

Sistem permulaan digunakan untuk melakukan *start up* sebelum turbin bekerja. Komponen yang biasa digunakan sebagai sistem ini pada turbin gas berupa *motor crankring*.

#### 2. Sistem Pemindah Daya

Sistem ini berfungsi untuk memindahkan daya serta putaran poros yang bergerak menuju poros yang akan digerakkan menggunakan *gear*.

### 3. Sistem Pembakaran

Sistem ini menggunakan bahan bakar berupa bahan bakar gas alam (*compresses natural gas*) memiliki tekanan berkisar  $15 \text{ kg/cm}^2$ . Bahan bakar tersebut harus memiliki kondisi yang bersih dari partikel padat dan cairan kondensat. Untuk mencapai kondisi yang diinginkan, sistem pembakaran ini dilengkapi *knock out drum* sebagai pemisah partikel padat dan cairan yang masih ada pada bahan bakar gas yang akan digunakan.

### 4. Sistem Pelumasan

Sistem ini disirkulasikan pada bagian utama turbin gas, *thrust bearing*, *accessory gear*, dan beberapa bagian lainnya dan dilakukan secara kontinyu. Sistem pelumasan terbagi menjadi beberapa bagian yaitu tangka pelumas, manometer pompa, sistem penyaring, sistem katup, sistem perpipaan, serta instrument yang digunakan sebagai pelumas.

### 5. Sistem Pendingin

Sistem ini digunakan untuk mendinginkan beberapa komponepada *section* dan *bearing* menggunakan air maupun udara. Komponen dari sistem ini terdiri dari *off base water cooling unit*, *lube oil cooler*, *main cooling water pump*, *temperature regulation valve*, *auxiliary water pump*, dan *low cooling water pressure switch*.