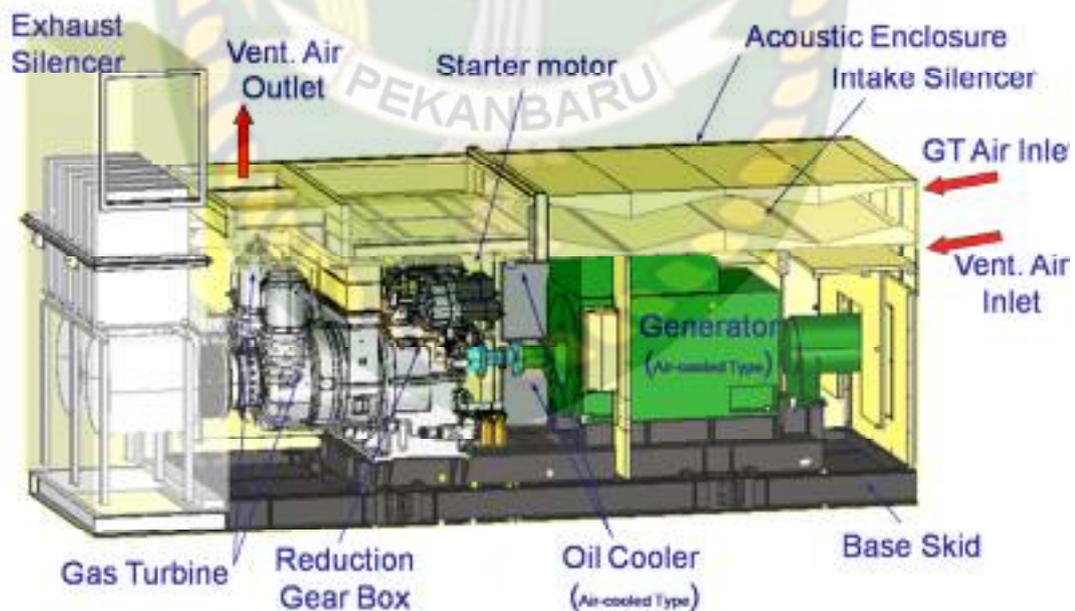


BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Turbin Gas

Turbin gas adalah suatu penggerak mula yang memanfaatkan gas sebagai fluida kerja. Didalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik berupa putaran yang menggerakkan roda turbin sehingga menghasilkan daya. Bagian turbin yang berputar disebut rotor dan bagian turbin yang diam disebut stator atau rumah turbin. Rotor memutar poros daya yang menggerakkan beban (generator listrik, pompa, kompresor atau yang lainnya). Gambar turbin gas dapat dilihat seperti gambar berikut.



Gambar 2.1 Turbin Gas.

Sumber: Maherwan P. Boyce (2010) *Gas Turbine Engineering Handbook Fourth Edition*

Turbin gas merupakan salah satu komponen dari suatu sistem turbin gas. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas. Menurut Dr. J. T. Retaliatta, sistem turbin gas ternyata sudah dikenal pada jaman *Hero of Alexandria*. Desain pertama turbin gas dibuat oleh John Barber seorang Inggris pada tahun 1791. Sistem tersebut bekerja dengan gas hasil pembakaran batu bara, kayu atau minyak, kompresornya digerakkan oleh turbin dengan perantaraan rantai roda gigi. Pada tahun 1872, Dr. F. Stolze merancang sistem turbin gas yang menggunakan kompresor aksial bertingkat ganda yang digerakkan langsung oleh turbin reaksi tingkat ganda. Tahun 1908, sesuai dengan konsepsi H. Holzworth, dibuat suatu sistem turbin gas yang mencoba menggunakan proses pembakaran pada. Tetapi usaha tersebut dihentikan karena terbentur pada masalah konstruksi ruang bakar dan tekanan gas pembakaran yang berubah sesuai beban. Tahun 1904, "*Societe des Turbomoteurs*" di Paris membuat suatu sistem turbin gas yang instruksinya berdasarkan desain Armen Gaud dan Lemate yang menggunakan bahan bakar cair. Temperatur gas pembakaran yang masuk sekitar 450°C dengan tekanan 45 atm dan kompresornya langsung digerakkan oleh turbin.

Selanjutnya, perkembangan sistem turbin gas berjalan lambat hingga pada tahun 1935 sistem turbin gas mengalami perkembangan yang pesat dimana diperoleh efisiensi sebesar lebih kurang 15%. Pesawat pancar gas yang pertama diselesaikan oleh "*British Thomson Houston Co*" pada tahun 1937 sesuai dengan konsep Frank Whittle (tahun 1930).

Saat ini sistem turbin gas telah banyak diterapkan untuk berbagai keperluan seperti mesin penggerak generator listrik, mesin industri, pesawat terbang dan lainnya. Sistem turbin gas dapat dipasang dengan cepat dan biaya investasi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan instalasi turbin uap dan motor diesel untuk pusat tenaga listrik.

2.2 Klasifikasi Sistem Turbin Gas

Turbin gas dapat dibedakan berdasarkan siklusnya, konstruksi poros dan lainnya. Menurut siklusnya turbin gas terdiri dari:

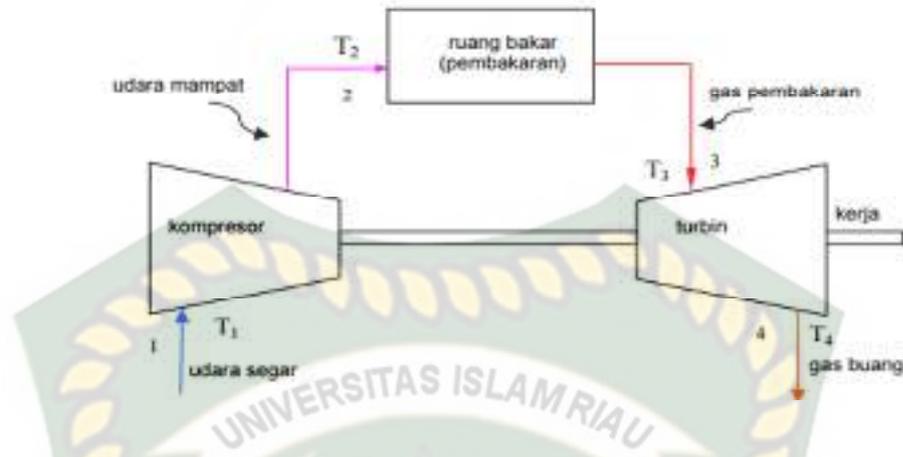
- Turbin gas siklus terbuka (*Open cycle*)
- Turbin gas siklus tertutup (*Close cycle*)

Perbedaan dari kedua tipe ini adalah berdasarkan siklus fluida kerja. Pada turbin gas siklus terbuka, akhir ekspansi fluida kerjanya langsung dibuang ke udara atmosfer, sedangkan untuk siklus tertutup akhir ekspansi fluida kerjanya didinginkan untuk kembali ke dalam proses awal.

Dalam industri turbin gas umumnya diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu:

1. Turbin gas siklus terbuka.

Sebuah turbin gas siklus terbuka sederhana terdiri dari kompresor, ruang bakar dan turbin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, Kompresor mengambil udara ambien dan menaikkan tekanannya. Panas ditambahkan pada udara di ruang bakar dengan membakar bahan bakar dan meningkatkan suhunya.



Gambar 2.2 Turbin Gas Siklus Terbuka

Sumber :YunusA. Cengel *thermodynamicsanengineeringapproach5thedition*

Gas-gas yang dipanaskan keluar dari ruang bakar yang kemudian diekspansi ke turbin membuat mekanik bekerja. Selanjutnya daya yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk mendorong kompresor dan aksesoris lainnya dan sisanya digunakan untuk pembangkit listrik. Karena udara masuk ke kompresor dan gas yang keluar dari turbin di buang ke atmosfer, media kerja harus digantikan terus-menerus. Jenis siklus ini dikenal sebagai siklus turbin gas terbuka dan umum digunakan di sebagian besar pembangkit listrik turbin gas karena memiliki banyak kelebihan.

1. Kelebihannya Siklus Terbuka :

- Waktu pemanasan: Begitu turbin dibawa sampai nilai kecepataannya dengan menjalankan motor dan menyulut bahan bakar, turbin gas sangat cepat dari awalnya dingin sampai beban penuh tanpa waktu pemanasan.
- Bahan bakar: Hampir setiap bahan bakar hidrokarbon dari bensin beroktan tinggi sampai minyak solar dapat digunakan dalam ruang pembakaran.

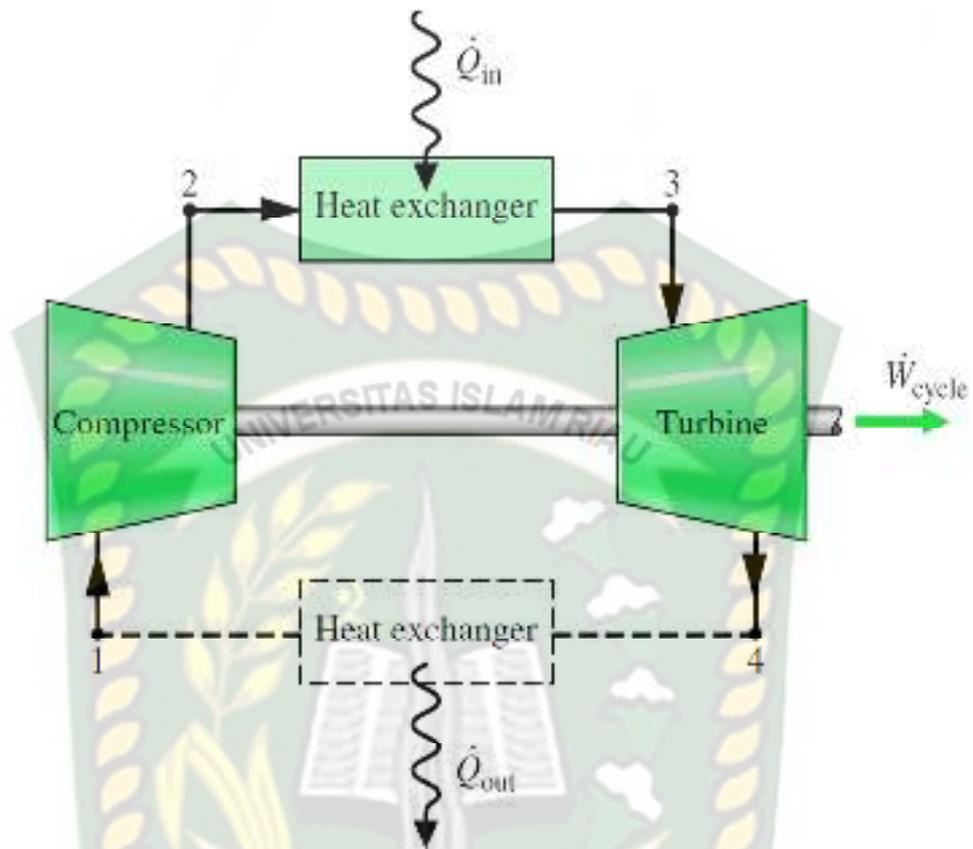
- Siklus pembangkit terbuka menempati ruang yang relatif kecil.
 - Syarat start cepat dan menangani beban terus menerus adalah poin yang mendukung dari pembangkit siklus terbuka ketika pembangkit ini digunakan sebagai pembangkit beban puncak.
 - Komponen atau pelengkap tambahan dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi thermal dan memberikan biaya keseluruhan yang paling ekonomis untuk faktor beban pembangkit dan kondisi operasi lainnya.
 - Pembangkit tenaga turbin gas siklus terbuka, kecuali yang memiliki sebuah intercooler, tidak memerlukan air pendingin. Oleh karena itu, pembangkit ini bebas dari media pendingin dan menjadi mandiri.
2. Kekurangannya Siklus Terbuka :
- Efisiensi sebagian beban pembangkit siklus terbuka berkurang secara cepat karena persentase yang cukup besar dari daya yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk menggerakkan kompresor.
 - Sistem ini sensitif terhadap efisiensi komponen: terutama dari kompresor. Pembangkit siklus terbuka sensitif terhadap perubahan suhu udara atmosfer, tekanan dan kelembaban.
 - Pembangkit turbin gas siklus terbuka memiliki laju udara yang tinggi dibandingkan dengan siklus lain, oleh karena itu diperlukan menghilangkan panas dalam gas buang dan membutuhkan saluran berdiameter besar.

Sangat penting mencegah debu memasuki kompresor untuk meminimalkan erosi dan deposisi pada bilah dan bagian-bagian kompresor dan turbin yang dapat merusak profil dan efisiensinya. Pengendapan karbon dan abu pada bilah turbin sama sekali tidak diinginkan karena akan mengurangi efisiensi turbin.

2. Turbin gas Siklus Tertutup

Siklus turbin gas tertutup yang berasal dan dikembangkan di Swiss. Pada tahun 1935, J. Ackeret dan C. Keller pertama kali diusulkan jenis mesin dan pabrik pertama selesai pada tahun 1944 di Zurich. Dalam turbin gas siklus tertutup, fluida kerja (udara atau gas) keluar dari kompresor dipanaskan dalam pemanas dengan sumber eksternal pada tekanan konstan. Suhu tinggi dan tekanan udara tekanan tinggi keluar dari pemanas eksternal dilewatkan melalui turbin.

Cairan yang keluar dari turbin didinginkan ke suhu aslinya dalam pendingin menggunakan sumber pendingin eksternal sebelum diteruskan ke kompresor. Fluida kerja terus digunakan dalam sistem tanpa fase dan panas yang dibutuhkan diberikan kepada fluida kerja dalam penukar panas berikut gambar 2.5 siklus tertutup.



Gambar 2.3 Turbin Gas Siklus Tertutup

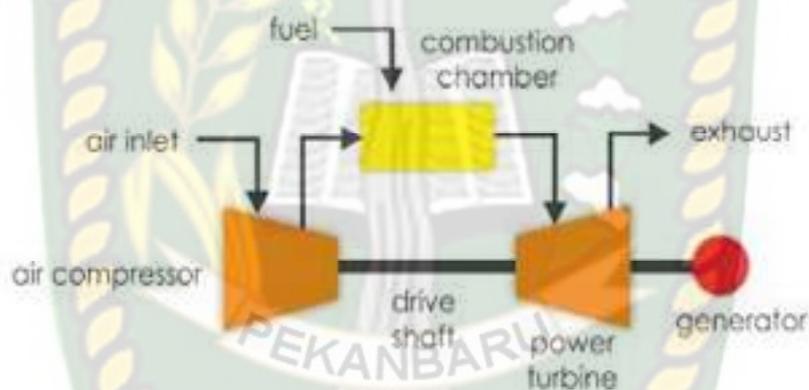
(Sumber :Yunus A. Cengel, Michael A. Boles (2004) *Thermodynamicsan engineeringapproach fifth edition*)

Perbedaan dari kedua tipe ini adalah berdasarkan siklus fluida kerja. Pada turbin gas siklus terbuka, akhir ekspansi fluida kerjanya langsung dibuang ke udara atmosfer, sedangkan untuk siklus tertutup akhir ekspansi fluida kerjanya didinginkan untuk kembali ke dalam proses awal

Dalam industri turbin gas umumnya di klasifikasikan dalam dua jenis yaitu Berdasarkan konstruksi porosnya :

1. Turbin Gas Poros Tunggal (*Single Shaft*)

Pada sistem poros tunggal, Seluruh komponen rotasi berada dalam satu poros. Komponen yang umumnya ada didalam Turbin Gas Poros Tunggal ini adalah kompresor udara, *compressor* turbin, dan Power Turbin. Power Turbin inilah yang akan menggerakkan generator. Turbin jenis ini digunakan untuk menggerakkan generator listrik yang menghasilkan energi listrik untuk keperluan proses di industri.

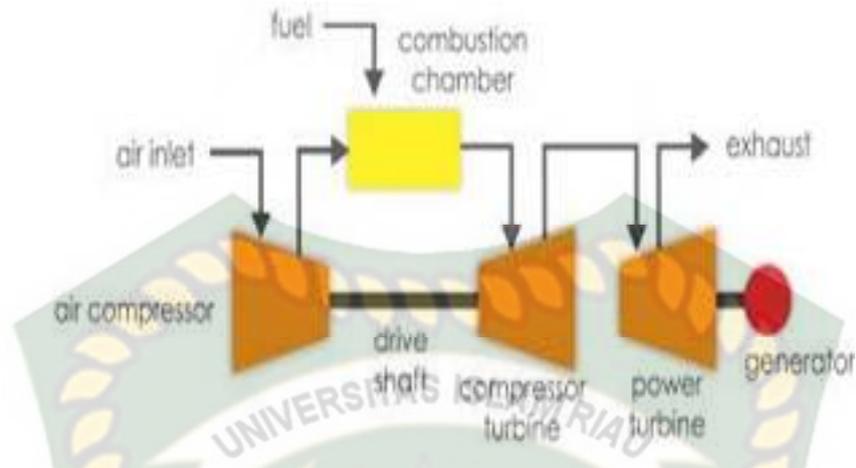


Gambar 2.4 Turbin Gas Poros Tunggal

(Sumber :Maherwan P. Boyce (2010) *Gas Turbine Engineering Handbook Fourth Edition*)

2. Turbin Gas Poros Ganda (*Double Shaft*)

Turbin ini merupakan turbin gas yang terdiri dari turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, dimana turbin gas ini digunakan untuk menggerakkan beban yang berubah seperti kompresor pada unit proses.



Gambar 2.5 Turbin Gas Poros Ganda

(Sumber :Maherwan P. Boyce (2010) *Gas Turbine Engineering Handbook Fourth Edition*)

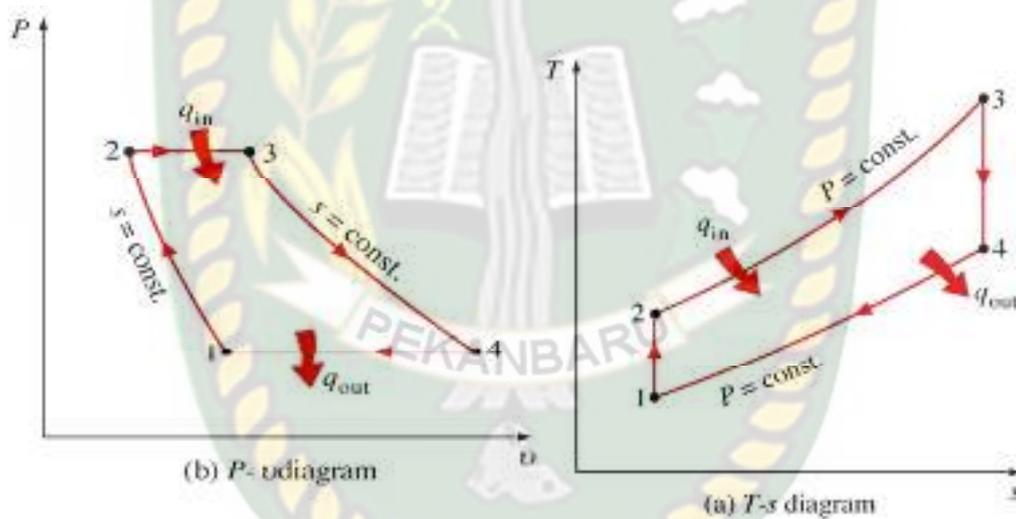
Beberapa pertimbangan dalam penggunaan sistem poros ganda:

1. Rotasi dengan kecepatan tinggi untuk meningkatkan efisiensi dari kompresor dan turbin gas. Oleh karena itu dengan poros yang terpisah, performa terbaik dari kompresor dan turbin dapat dicapai.
2. Menggunakan mesin *Aeroderivative* menandakan, dapat mengganti *Power Turbine* dan disesuaikan dengan desain dan output yang kita inginkan.
3. Mesin dengan poros ganda ini buruk dalam hal respon dibandingkan dengan Turbin Gas Poros Tunggal. Karena respon yang lambat akan berakibat pada performa mesin pada saat penggunaannya, akan ada energi yang hilang dari lambatnya respon.

2.3 Siklus Brayton

Siklus ini merupakan siklus daya termodinamika ideal untuk turbin gas, sehingga saat ini siklus ini yang sangat populer digunakan oleh pembuat mesin turbin atau manufaktur dalam analisa untuk *performance* turbin gas.

Siklus Brayton ini terdiri dari proses kompresi isentropik yang diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan. Pada siklus Brayton tiap-tiap keadaan dapat dianalisa secara berikut pada gambar 2.6 dan 2.7 :



Gambar 2.6. Diagram P-V Siklus Brayton

Gambar 2.7. Diagram T-S Siklus Brayton

Urutan proses kerja sistem turbin gas adalah:

Dari diagram T – S tersebut, proses yang terjadi adalah:

- a) Proses 1- 2 : Proses kompresi isentropik pada kompresor

Proses ini merupakan proses kerja kompresor. Kerja spesifik kompresor ini sendiri adalah kalor spesifik yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor pada kondisi ideal.

$$W_k = C_p (T_2 - T_1)$$

- b) Proses 2 – 3: Proses pembakaran pada tekanan konstan (isobar) dalam ruang bakar.

Proses ini merupakan proses terjadinya pemasukan panas yang juga berarti besarnya kalor spesifik pada ruang bakar.

$$Q_{in} = C_p (T_3 - T_2)$$

- c) Proses 3- 4 : Proses Isentropik pada turbin

Proses ini merupakan proses kerja turbin

$$W_T = C_p (T_3 - T_2)$$

- d) Proses 4- 1 : Proses pembuangan kalor pada tekanan konstan

Proses ini menyatakan besarnya kalor spesifik pada proses pembuangan kalor.

$$Q_{out} = C_p (T_4 - T_1)$$

Dari kerja spesifik yang terjadi pada setiap proses diatas maka:

1. Kerja netto siklus (W_{net})

kerja netto siklus adalah selisih kerja yang dihasilkan turbin dengan kerja yang dibutuhkan kompresor tiap kg gas.

$$W_{net} = W_T - W_K$$

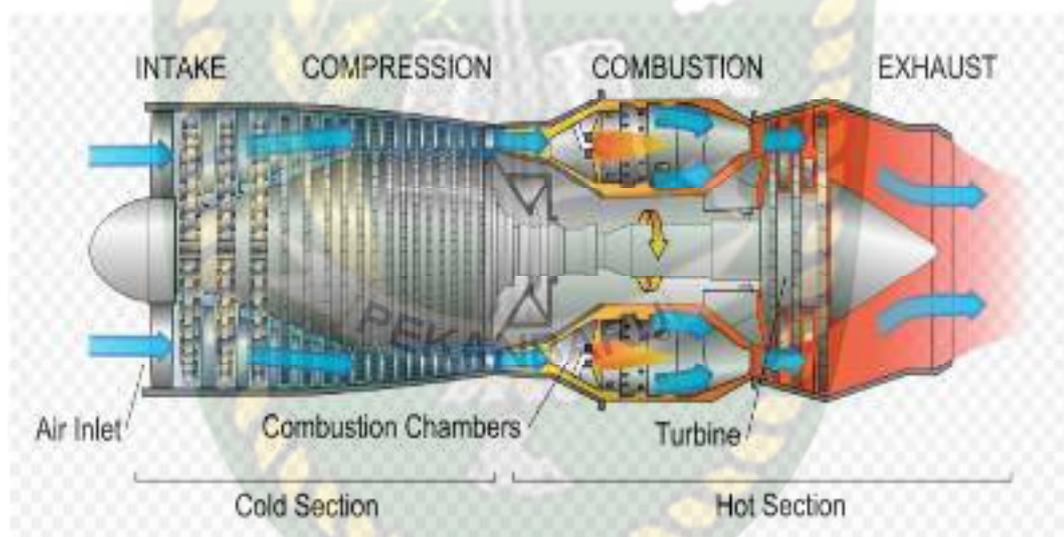
2. Efisiensi Siklus (n_{th})

Efisiensi siklus adalah perbandingan antara kerja netto dengan pemasukan energi.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

2.4 Komponen Sistem Turbin Gas

2.4.1 Komponen Utama Sistem Turbin Gas



Gambar 2.8 Komponen Sistem Turbin Gas

(Sumber :Maherwan P. Boyce (2010) *Gas Turbine Engineering Handbook Fourth Edition*)

Turbin gas tersusun oleh komponen utama seperti *starting diesel* motor, *compressor section*, *combustion section*, *turbine section*, dan *generator*. Dari beberapa komponen utama tersebut terbagi atas :

1. *Air Inlet Section*, berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:

- *AirInlet Housing*, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat peralatan pembersih udara.
- *Inertia Separator*, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
- *Pre-Filter*, merupakan penyaringan udara awal yang dipasang pada *inlet house*.
- *Main Filter*, merupakan penyaring utama yang terdapat pada bagian dalam *inlet house*, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
- *Inlet Bellmouth*, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
- *Inlet Guide Vane*, merupakan *blade* yang berfungsi sebagai pengatur jumlah udara yang masuk agar sesuai dengan yang diperlukan
- *Compressor Section*, komponen utama pada bagian ini adalah aksial *flow compressor*, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari *inlet airsection* hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. Aksial *flow compressor* terdiri dari dua bagian yaitu:
 - *Compressor Rotor Assembly*, Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari

wheels, stubshaft, tie bolt, dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor.

- *Compressor Stator*. Merupakan bagian dari *casing* turbin gas yang terdiri dari :

1. *Inlet Casing*, merupakan bagian dari *casing* yang mengarahkan udara masuk ke *inlet bellmouth* dan selanjutnya masuk ke *inlet guide vane*.
2. *Forward Compressor Casing*, bagian *casing* yang didalamnya terdapat empat *stage* kompresor *blade*
3. *Aft Casing*, bagian *casing* yang didalamnya terdapat *compressor blade* tingkat 5-10.
4. *Discharge Casing*, merupakan bagian *casing* yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi.

3. *Combustion Section*.

Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke *transition pieces* yang juga berfungsi sebagai *nozzle*.

Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar *frame* dan penggunaan turbin gas. Komponen- komponen itu adalah:

- *Combustion Chamber*, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
- *Combustion Liners*, terdapat didalam *combustion chamber* yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
- *Fuel Nozzle*, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam *combustion liner*
- *Ignitors (Spark Plug)*, berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam *combustion chamber* sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
- *Transition Fieces*, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran *nozzle* dan sudu-sudu turbin gas.
- *Cross Fire Tubes*, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua *combustion chamber*.
- *Flame Detector*, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

4. Turbin Section.

Turbin *section* merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60 % digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan. Komponen- komponen pada turbin *section* adalah sebagai berikut:

- *Turbin Rotor Case*

- *First Stage Nozzle*, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke *first stage turbine wheel*.
- *First Stage Turbine Wheel*, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
- *Second Stage Nozzle* dan *Diafragma*, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke *second stage turbine wheel*, sedangkan *diafragma* berfungsi untuk memisahkan kedua turbin *wheel*.
- *Second Stage Turbine*, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari *first stage turbine* untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.

5. Generator

Generator adalah suatu pembangkit energi listrik dari suatu proses konversi energi mekanik pada poros turbin dikonversikan menjadi energi listrik. Dalam proses operasinya ditunjang dengan peralatan bantu khususnya meliputi:

- *Jacking oil pump*
- *Exciter*
- *Generator circuit breaker*
- *Main transformer*
- *Generator protection system*
- *Auxiliary power system*

2.5 Ruang Bakar

Ruang bakar adalah tempat dimana diharapkan terjadi percampuran udara yang telah dimanfaatkan oleh kompresor dengan bahan bakar.

Sebuah ruang bakar haruslah memenuhi beberapa kriteria untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi dari sebuah instalasi turbin gas. beberapa kriteria yang diharapkan terdiri dari:

- Efisiensi pembakaran tinggi (bahan bakar harus terbakar sempurna sehingga semua energi kimia dapat dikonversikan menjadi energi kalor)
- Daerah stabilitas pembakaran yang luas (nyala api tidak akan padam dalam daerah tekanan dan kecepatan)
- Bebas dari pulsasi tekanan
- Kerugian tekanan rendah
- Dapat menggunakan berbagai macam bahan bakar.

Beberapa bagian dari instalasi ruang bakar adalah:

1. Ruang bakar pembakaran (*combustion chamber*)

Merupakan tempat terjadinya seluruh proses pembakaran. Pada turbin ini terdapat 10 buah *combustion can* yang saling berhubungan.

Tabung pipa api (*cross fire tube*)

Penghubungan antara *can* dan juga *combustion liner*.

2. Ruang bakar utama

Merupakan komponen yang terdapat di dalam *can* dan juga bagian *combustion liner*.

3. Pelindung ruang bakar

Merupakan komponen penutup bagian combustion can dan bagian ini juga sebagai tempat dudukan nozzle

4. Pematik nyala api

Sebagai alat pematik untuk membakar campuran udara dan bahan bakar tepat pada waktunya.

5. Nozel dan selang bahan bakar (*fuel nozzle and pigtails*)

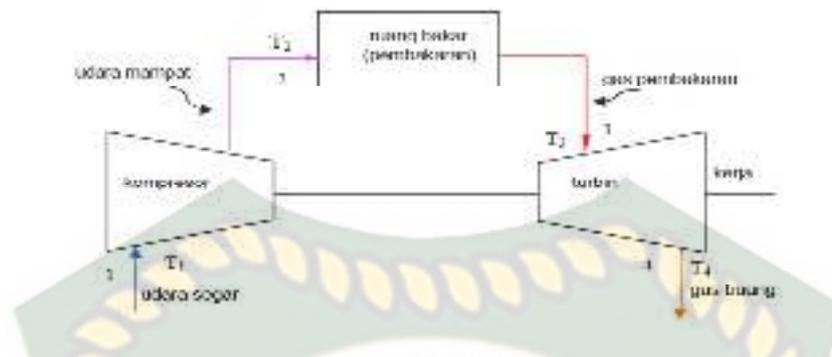
Merupakan tempat untuk menyempatkan bahan bakar gas kedalam combustion liner dan bercampur dengan udara. Sedangkan pigtails (*gas fuell lines*) adalah pipa yang menghubungkan saluran bahan bakar gas dengan *fuell nozzle*.

6. Bagian transisi (*transision place*)

Merupakan komponen yang digunakan untuk mengarahkan udara dengan kecepatan tinggi yang dihasilkan pada combustion section.

2.5.1 Prinsip Kerja Turbin Gas.

Suatu instalasi turbin gas terdiri dari tiga komponen utama, yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin. Untuk lebih jelasnya bagaimana prinsip kerja suatu instalasi turbin gas sebagai penggerak generator dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.9. Prinsip kerja instalasi turbin gas

Proses kerja dari turbin gas yang terlihat seperti gambar dimulai dari udara yang dihisap ke dalam inlet house yang memiliki saringan - saringan udara. saringan - saringan ini berfungsi untuk menahan kotoran - kotoran atau debu - debu agar tidak masuk ke dalam kompresor. Udara yang sudah disaring tersebut kemudian masuk ke dalam kompresor untuk dimanfaatkan. Udara yang telah dimanfaatkan dan bertekanan tinggi tersebut dialirkan ke dalam ruang bakar (combustion chamber). Di dalam ruang bakar tersebut fluida kerja dicampur dengan bahan bakar yang berupa gas alam murni. Di dalam ruang bakar, campuran bahan bakar dan udara tersebut terbakar dengan bantuan spark plug dan menimbulkan panas yang tinggi dan kecepatan yang tinggi pula. Karena proses pembakaran tersebut dapat menghasilkan gas bertemperatur tinggi dalam waktu yang lama, maka perlu diturunkan temperaturnya dengan memanfaatkan udara yang relatif lebih dingin. Hal ini erat kaitannya dengan ketahanan material sudu-sudu turbin yang terbatas dalam menerima gas panas hasil pembakaran tersebut. Gas hasil pembakaran dengan kecepatan tinggi tersebut mengalir melewati

transition piece menuju turbine section. Fluida kerja tersebut diarahkan oleh first stage nozzle menumbuk first stage turbine sehingga menambah kecepatan putar dari rotor. Fluida kerja yang telah keluar dari first stage turbin tersebut masih memiliki kecepatan putar yang tinggi, sehingga bisa dimanfaatkan lagi untuk menambah kecepatan putar rotor dengan mengalirkan fluida panas tersebut menumbuk second stage turbin.

Jadi energi kinetik yang dihasilkan dimanfaatkan semaksimal mungkin. Setelah keluar dari turbine section, udara tersebut dibuang ke atmosfer melalui exhaust section. Suhu udara buangan tersebut kira – kira 500°C. Rotor yang berputar tersebut dihubungkan ke generator listrik.

Pada waktu start pertama, rotor diputar oleh sebuah motor penggerak. Setelah mencapai kecepatan putar tertentu (kurang lebih 300 rpm), hubungan antara motor penggerak dan rotor terputus dan motor dimatikan. Lalu rotor berputar sendiri dengan adanya siklus pembakaran yang terus - menerus.

2.5.2 Syarat - Syarat Ruang Bakar Turbin Gas

Ruang bakar turbin gas secara umum harus sesuai dengan kondisi pemakaian dan sesuai dengan kebutuhan yang berbeda – beda dari setiap turbin gas.

Syarat – syarat dasar yang harus dimiliki ruang bakar antara lain :

1. Mempunyai efisiensi pembakaran yang tinggi dimana bahan bakar harus terbakar sempurna sehingga seluruh energi kimia dapat berubah menjadi energi thermal.

2. Mudah untuk pembakaran awal, terutama untuk temperatur lingkungan yang terjadi rendah.
3. Kerugian tekanan yang terjadi rendah.
4. Mempunyai emisi gas yang rendah
5. Mempunyai daya tahan yang tinggi
6. Panas temperatur ruang bakar harus tetap menjaga umur dari turbin dan sudu pengarah.
7. Mempunyai batas stabilitas yang luas, dimana api harus tetap nyala dalam mencakup tekanan, serta kecepatan perbandingan bahan bakar udara.
8. Perawatan yang ekonomis.

2.5.3 Prinsip Kerja Ruang Bakar

Udara pembakaran (combustion air) yang merupakan udara hasil pemanfaatan dari kompressor mengalir dalam anulus menuju bagian puncak liner atau ke saluran udara primer yang terletak pada bagian sisi silindris dari burner dan sebagian udara kompresi masuk ke ruang bakar melalui saluran udara sekunder atau hole untuk menyempurnakan kebutuhan udara dan sebagai pendingin ruang bakar. Pada saat yang bersamaan busi menyala (spark-plug) memercikkan bunga api listrik ke sistem saluran utama bahan bakar pada burner sehingga pada burner terjadi pembakaran. Setelah proses pembakaran terjadi dengan sempurna, maka busi penyalanya secara otomatis berhenti bekerja, sedangkan gas pemanasan hasil pembakaran dengan temperatur yang tinggi mengalir ke turbin gas melalui saluran (duck) dan sudu pengarah (transition piece) masuk memutar poros turbin.

2.5.4 Bahan Bakar dan Reaksi Pembakaran

Gas alam adalah bahan bakar fosil yang merupakan senyawa hidrokarbon (C_nH_{2n+2}) dan terdiri dari campuran beberapa macam gas hidrokarbon yang mudah terbakar dan non-hidrokarbon seperti N_2 , CO_2 dan H_2S . Umumnya gas yang terbentuk sebagian besar dari metana (CH_4), dan dapat juga etana (C_2H_6) dan propana (C_3H_8). Komponen utama dalam gas alam adalah metana (CH_4), yang merupakan molekul hidrokarbon rantai terpendek dan teringan. Gas alam juga mengandung molekul-molekul hidrokarbon yang lebih berat seperti etana (C_2H_6), propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}), selain juga gas-gas yang mengandung sulfur (belerang). Gas alam juga merupakan sumber utama untuk sumber gas helium.

Gas alam lebih ringan dari udara, sehingga cenderung mudah tersebar di atmosfer. Akan tetapi bila ia berada dalam ruang tertutup, seperti dalam rumah, konsentrasi gas dapat mencapai titik campuran yang mudah meledak, yang jika tersulut api, dapat menyebabkan ledakan yang dapat menghancurkan bangunan. Kandungan metana yang berbahaya di udara adalah antara 5% hingga 15%

Gas alam digunakan sebagai bahan bakar turbin gas lebih diprioritaskan karena:

1. Pembakaran gas tidak menghasilkan abu dan jelaga sehingga akan memperkecil kerusakan yang dialami sudut - sudut turbin
2. Pembakaran dengan gas alam relatif lebih sempurna, sehingga bahan bakar ini cenderung mengurangi polusi yang dihasilkan dari gas buang turbin.
3. Nilai kalor gas alam (natural gas) lebih besar dari bahan bakar solar, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dari turbin gas tersebut.

Komposisi dari gas alam (natural gas) dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini:

No	Nama Gas	Komposisi (%)
1	Karbon dioksida (CO ₂)	0.023
2	Nitrogen (N ₂)	2.019
3	Methana (CH ₄)	97.031
4	Ethana (C ₂ H ₂)	0.227
5	Propana (C ₂ H ₈)	0.658
6	n-Butana (n-C ₄ H ₁₀)	0.03
	Total	100

Tabel 2.1 Komposisi dari gas alam (natural gas)

Sumber: Arun Plant Orientation, Training Center

2.5.5 Proses Pembakaran

Proses pembakaran adalah reaksi eksotermik antara bahan bakar dan udara untuk menghasilkan gas pembakaran pada temperatur dan tekanan tertentu. Proses pembakaran mencakup fenomena fisika dan kimia, bukan sekedar merupakan bagian kimia saja. Hal tersebut disebabkan karena dalam proses pembakaran terdapat pulaperpindahan massa, termodinamika, dinamika gas dan mekanika fluida.

Proses pembakaran dalam ruang bakar berlangsung kontinu pada tekanan konstan. Kalaupun terjadi kerugian tekanan, relatif sangat kecil dan perbandingan penurunan tekanan total terhadap tekanan total udara masuk ruang bakar berkisar

3 - 5%. Pembakaran gas metan terjadi secara kimiawi yaitu dengan terjadinya reaksi antara metan dan oksigen yang hasilnya berupa karbon di-oksida (CO₂), air (H₂O) ditambah sejumlah besar energi (energi sebagai pemicu terjadinya pembakaran). Reaksi pembakaran bahan bakar pada kondisi stokometri (100% udara teoritis) adalah :

– Reaksi pembakaran sempurna CH₄



– Reaksi pembakaran sempurna C₂H₆



– Reaksi pembakaran sempurna C₃H₈



– Reaksi pembakaran sempurna C₄H₁₀



2.6 Bahan Bakar Solar

2.6.1 Pengertian Bahan Bakar Solar

Solar adalah bahan bakar jenis distilat yang digunakan untuk mesin Compression Ignition (Motor Diesel). Kualitas bahan bakar solar ditentukan oleh angka Cetana (Cetana Number). Makintinggi cetana number semakin mudah suatu solar untuk dibakar. Bahan bakar solar biasanya dipakai untuk mesin-mesin Diesel putaran tinggi (diatas 1000 RPM) dan juga digunakan pada pembakaran langsung yang dibutuhkan pembakaran bersih. Solar juga biasa disebut sebagai Gas Oil atau High Speed Diesel. Untuk menghasilkan emisi gas

buang yang rendah kendaraan diesel dapat juga dilengkapi dengan “Catalitic Converter”

2.6.2 Fitur Bahan Bakar Solar

Solar mengandung energi panas 12% lebih banyak dari pada bensin dengan jumlah yang sama. Bahan bakar pada mesin diesel tidak dinyalakan dengan percikan api (busi), tetapi dinyalakan oleh panas yang dihasilkan kompresi yang tinggi (400-700 PSI /2800-4800 KPa) yang menghasilkan suhu $1200^{\circ}\text{F} - 1600^{\circ}\text{F}$ ($700^{\circ}\text{C}-900^{\circ}\text{C}$)

2.6.3 Persyaratan Bahan Bakar Solar

Bahan bakar diesel harus memenuhi beberapa karakteristik sebagai berikut:

a. Kebersihan

Solar harus bersih bebas dari air, solar juga seperti pelumas dan pendingin untuk pompa injeksi dan injector

b. Low Temperatur Fluidity

Solar harus mampu mengalir dengan bebas pada semua temperature yang diharapkan. Salah satu spesifikasi solar yaitu “titik tuang” yaitu suhu minimal solar dapat mengalir

c. Titik Beku

Titik beku adalah suhu dimana terbentuk nya Kristal lilin dari solar yang membeku yang dapat menyumbat aliran bahan bakar.

2.6.4 Nilai Kalori Bahan Bakar Solar

Nilai kalori adalah angka yang menyatakan jumlah panas/kalori yang dihasilkan dari proses pembakaran sejumlah bahan bakar dengan udara/oksigen. Nilai kalori bahan bakar minyak berkisar 10.160 - 11.00 K cal/kg. Nilai kalori berbanding terbalik dengan berat jenis, artinya semakin besar berat jenisnya semakin kecil atau rendah nilai kalorinya. Sebagai contoh solar lebih berat dari pada bensin, tetapi nilai kalorinya lebih besar bensin. Nilai kalori diperlukan untuk dasar perhitungan jumlah konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan mesin dalam suatu priode tertentu. Nilai kalori dinyatakan dalam satuan Kcal/kg atau BTU/lb (satuan british)

2.6.5 Visikositas Bahan Bakar Solar

Visikositas adalah suatu angka yang menyatakan besarnya hambatan dari suatu bahan cair untuk mengalir atau ukuran dari besarnya tahanan geser dari cairan. Makin tinggi visikositasnya maka minyak akan kental dan semakin susah mengalir. Untuk mengukur visicositas digunakan alat viscosmeter.

Ada bermacam macam cara mengukur visikositas adalah:

1. Redwood I diukur dalam satuan detik
2. Redwood II diukur dalam satuan detik
3. Saybold Universal diukur dalam satuan detik
4. Engler diukur dalam satuan OE (merupakan hasil bagi dari perbandingan waktu yang diperlukan untuk mengalirkan 200⁰cc minyak pada suhu 20 oc dengan air sebanyak 200⁰cc pada 20 oc dengan viscometer Engler)
5. Kinematik diukur dalam Contistoke (mm²/s)

2.6.6 Angka Cetane Bahan Bakar Solar

Angka cetane adalah ukuran bahan bakar dapat dengan mudah dinyalakan. Angka cetane solar harus berada antara 45-50, semakin tinggi angka cetane maka semakin mudah solar tersebut dinyalakan. Angka cetane menyatakan kualitas bahan bakar mesin diesel yang diperlukan untuk mencegah terjadinya Knocking pada motor diesel. Mesin diesel putaran tinggi memerlukan angka cetane yang lebih tinggi. Untuk menentukan angka cetane digunakan bahan bakar standart yaitu dari campuran normal cetane (C₁₆ H₃₄) yang mempunyai waktu pembakaran tertunda sangat pendek dengan α -methyl naptalene (C₁₆ H₇ CH₃) dalam satuan volume. Bahan bakar yang diukur dibandingkan dengan bahan bakar standart. Bahan bakar dengan angka cetane yang rendah akan mengakibatkan sifat-sifat pembakaran yang buruk dan mesin susah hidup. Berikut spesifikasi bahan bakar solar.

No.	Karakteristik	Satuan	Batasannya		Metode Uji	
			Min	Max	ASTM	Others
1	Bilangan Cetane			-		
	-Angka Cetane, normal		48		D 613	
	-Indeks Cetane		45		D 4737	
2	Densitas pada 15°C	kg/m ³	875	870	D 4052/T298	
3	Viskositas pada 40°C	mm ² /s	2,0	2,0	D 445	
4	Kandungan Sulfur	ppm	-	0,15	D 3227	
5	Densitas				D 155	
	15°C	kg/m ³	-	870		
6	Titik Nyala	°C	60		D 93	
7	Titik Turun	°C		18	D 97	
8	Residu Karbon	ppm		0,1	D 4530	
9	Kandungan Air	mg/kg		500	D 1701	

Tabel 2.2 Spesifikasi Bahan Bakar Solar

Sumber: Arun Plant Orientation, Training Center

2.7 Bahan Bakar Gas

Gas adalah bahan bakar fosil yang berbentuk gas yang terutama terdiri dari metana (CH_4). Gas dapat ditemukan diladang minyak, ladang gas bumi dan juga tambang batu bara. Ketika gas yang kaya dengan metana produksi melalui pembusukan oleh bakteri naerobij dari bahan-bahan organik selain dari fosil, maka ia disebut bio gas. Sumber biogas dapat ditemukan dirawa-rawa, tempat pembuangan akhir sampah serta, penampungan kotoran manusia dan hewan. Komposisi kimia komponen utama dalam gas alam adalah metana (CH_4), yang merupakan molekul hidrokarbon rantai terpendek dan teringan. Gas alam juga mengandung molekul-molekul hidrokarbon yang lebih berat seperti etana (C_2H_6), propane (C_3H_8), dan butane (C_4H_{10}), selain juga gas-gas yang mengandung sulfur (belerang). Gas alam juga merupakan sumber utama untuk sumbergas helium.

Metana adalah gas rumah kaca yang dapat menciptakan pemanasan global ketika terlepas ke atmosfer, dan umumnya dianggap sebagai polutan ketimbang energi yang berguna. Meskipun begitu, metana di atmosfer bereaksi dengan ozon, memproduksi karbon dioksida dan air, sehingga efek rumah kaca dari metana yang terlepas keudara relatif hanya berlangsung sesaat. Sumber metana yang berasal dari makhluk hidup kebanyakan berasal dari rayap, ternak (mamalia), dan pertanian (diperkirakan kadar emisinya sekitar 15,75 dan 100 juta ton pertahun secara berturut-turut).

Komponen%

Metana (CH₄) 80-95

Etana (C₂H₆) 5-15

Propana (C₃H₈) dan Butane (C₄H₁₀) <>

Nitrogen, helium, karbon dioksida (CO₂), hydrogen sulfida (H₂S), dan air dapat juga terkandung didalam gas alam. Merkuri dapat juga terkandung dalam jumlah kecil. Komposisi gas alam bervariasi sesuai dengan sumber ladang gasnya. Campuran organosulfur dan hydrogen sulfida adalah kontaminan (pengotor) utama dari gas yang harus dipisahkan. Gas dengan jumlah pengotor sulfur yang signifikan dinamakan sour gas dan sering disebut juga "acid gas (gas asam)" Gas alam yang telah diproses dan akan dijual bersifat tidak berasa dan tidak berbau. Akan tetapi, sebelum gas tersebut didistribusikan kepenggunaan akhir, biasanya gas tersebut diberi bau dengan menambahkan thiol, agar dapat terdeteksi jika terjadi kebocoran gas. Gas alam yang telah diproses itu sendiri sebenarnya tidak berbahaya, akan tetapi gas alam tanpa proses dapat menyebabkan tercekiknya pernafasan karena ia dapat mengurangi kandungan oksigen diudara pada level yang dapat membahayakan. Gas alam dapat berbahaya karena sifatnya yang sangat mudah terbakar dan menimbulkan ledakan. Gas alam lebih ringan dari pada udara, sehingga cenderung lebih mudah tersebar diatmosfer. Tetapi bila berada diruang tertutup, seperti didalam rumah, konsentrasi gas dapat mencapai titik campur yang mudah meledak yang jika tersulut api dan dapan menyebabkan ledakan yang dapat menghancurkan bangunan. Kandungan metana yang berbahaya diudara adalah antara 15%. Ledakan untuk gas alam terkompresi

dikendaraan umumnya tidak mengkhawatirkan karena sifatnya yang lebih ringan dan konsentrasinya yang diluar rentang 5-15% yang dapat menimbulkan ledakan. Kandungan energi pembakaran satu meter kubik gas alam komersial menghasilkan 38 MJ (10,6 kWh).

2.8 Parameter Performance Turbin Gas

Prestasi turbin gas menunjukkan kinerja suatu mesin/ peralatan. Dalam analisa turbin gas ada beberapa parameter *performance* yang harus di hitung, Diantaranya panas yang masuk ke ruang bakar (Q_m), daya poros efektif (N_e), torsi (T), laju aliran massa bahan bakar (\dot{m}_f), pemakaian bahan bakar spesifik (SFC), efisiensi thermal (η_{th}), dan kerja yang berguna (W_n).

2.8.1 Panas Yang Masuk

Panas yang masuk menyatakan hasil kali antara nilai kalor bahan bakar dengan laju aliran massa bahan bakar. Panas yang masuk keruang bakar ini digunakan untuk proses terjadinya pembakaran di ruang bakar yang dinyatakan dalam satuan kJ/jam .

$$Q_m = \dot{m}_f \cdot LHV$$

Dimana :

Q_m = Panas yang masuk ke ruang bakar (kJ/jam)

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

LHV = Nilai kalor bahan bakar (kJ/ kg)

2.8.2 Daya

Pada turbin, daya yang berguna ialah daya poros, karena daya poros itulah menggerakkan beban. Daya poros itu sendiri dihasilkan dari proses pembakaran yang merubah panas menjadi energi mekanik, energi mekanik tersebut digunakan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin kemudian turbin memutar generator atau beban. Daya poros dihitung dalam Watt ($N.m/s$) atau dalam kW . Dengan demikian besar daya poros adalah :

$$N_T = N_K + N_e$$

dimana, N_T = Daya Turbin (kW)

N_K = Daya Kompresor (kW)

N_e = Daya Efektif (kW)

$$N_T = (m_a + m_f) \cdot W_T$$

dimana, N_T = Daya Turbin (kW)

m_a = Laju aliran massa udara (kg/jam)

m_f = laju aliran massa bahan bakar (kg/jam)

W_T = kerja turbin (kJ/kg)

$$N_K = m_a \cdot w_k$$

2.8.3 Torsi (T)

$$T = 9,74 \times 10^5 \frac{P_{turbin}}{n}$$

Dimana : T = Momen torsi ($N.m$)

P_{turbin} = Daya turbin (kW)

n = Putaran poros (*rpm*)

2.8.4 Laju Aliran Massa Bahan Bakar(\dot{m}_f)

Untuk mengukur banyaknya bahan bakar yang terpakai digunakan gelas ukur, yang merupakan fluks volume dikalikan massa bahan bakar menghasilkan fluks massa atau dinyatakan dalam kg/jam. Fluks massa atau aliran bahan bakar dituliskan dalam persamaan berikut :

$$\dot{m}_f = Q \cdot \rho_{bb}$$

Karena volume bahan bakar (ΔV) yang dipakai ditentukan, maka :

$$Q = \frac{V}{\Delta t}$$

Sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\dot{m}_f = \frac{V}{\Delta t} \cdot \rho_{bb} \cdot 3600$$

Dimana : \dot{m}_f = Laju aliran massa bahan bakar (*kg/jam*)

V = Volume bahan bakar yang diuji (m^3)

Δt = waktu untuk menghabiskan bahan bakar uji (*s*)

ρ_{bb} = Massa jenis bahan bakar (kg/m^3)

2.8.5 Pemakaian Bakar Spesifik (*SFC*)

Pemakaian bahan bakar spesifik didefinisikan sebagai banyaknya bahan bakar yang terpakai per jam untuk menghasilkan setiap *kW* daya turbin. Pemakaian

bahan bakar spesifik dipakai sebagai ukuran ekonomi pemakaian bahan bakar, semakin rendah harganya maka dapat dinyatakan sebagai efisiensi yang semakin tinggi.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{Ne}$$

Dimana : SFC = Pemakaian bahan bakar spesifik ($kg/kW.h$)

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

Ne = Daya poros efektif (kW)

2.8.6 Efisiensi Termal (η_{th})

Efisiensi termal menyatakan perbandingan antara daya yang dihasilkan terhadap jumlah energi bahan bakar yang diperlukan untuk jangka waktu tertentu. Efisiensi termal dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\eta_{th} = \frac{Q_m - Q_k}{Q_m}$$

Dimana : η_{th} = Efisiensi thermal

Q_m = Panas yang masuk ke ruang bakar (kJ/Jam)

Q_k = Panas yang keluar dari gas buang (kJ/jam)

$$Q_k = m_{gb} \times (h_4 - h_1)$$

2.8.7 Kerja Yang Berguna

Kerja yang berguna adalah kerja efektif yang dihasilkan oleh instalasi turbin gas. Dapat dicari dengan perbandingan antara panas yang masuk ke ruang

pembakaran di kurangi dengan panas yang keluar dari ruang pembakaran. Dapat dinyatakan dalam satuan kJ/jam .

$$W_n = Q_m - Q_k$$

Dimana :

W_n = Kerja yang berguna (kJ/jam)

Q_m = Panas yang masuk ke ruang bakar (kJ/jam)

Q_k = Panas yang keluar dari gas buang (kJ/jam)

