

DIKTAT KULIAH
MESIN KONVERSI ENERGI



HERRY IRAWANSYAH, ST., M.ENG

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
2017

KATA PENGANTAR

Diktat Mesin Konversi Energi ini memaparkan teori dasar konversi energi. Pada bab awal dipaparkan sumber-sumber energi yang mendasari teori mesin konversi energi. Fokus pembahasan di dalam buku ajar MKE ini adalah mesin mesin yang mengkonversi sumber-sumber energi yang tersedia di alam untuk menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan.

DAFTAR ISI

BAB I	ENERGI	1
BAB II	MOTOR PEMBAKARAN DALAM	3
BAB III	TURBIN GAS	12
BAB IV	MOTOR PEMBAKARAN LUAR	18
BAB V	MESIN-MESIN FLUIDA	25
BAB V	MESIN KONVERSI ENERGI NON KONVENSIONAL	32
	DAFTAR PUSTAKA	45

BAB I

ENERGI

1.1 Macam-macam Energi

a) **Energi Mekanik**

Benda yang bergerak atau memiliki kemampuan untuk bergerak, memiliki energi mekanik. Air terjun yang berada di puncak tebing memiliki energi mekanik yang cukup besar, demikian juga dengan angin.

b) **Energi Bunyi**

Energi bunyi adalah energi yang dihasilkan oleh getaran partikel-partikel udara disekitar sebuah sumber bunyi. Contoh : Ketika radio atau televisi beroperasi, pengeras suara secara nyata menggerakkan udara didepannya. Caranya dengan menyebabkan partikel-partikel udara itu bergetar. Energi dari getaran partikel-partikel udara ini sampai ditelinga, sehingga kamu dapat mendengar.

c) **Energi Kalor**

Energi kalor adalah energi yang dihasilkan oleh gerak internal partikel-partikel dalam suatu zat. Contoh : apabila kedua tanganmu digosok-gosokkan selam beberapa detik maka tanganmu akan terasa panas. Umumnya energi kalor dihasilkan dari gesekan. Energi kalor menyebabkan perubahan suhu dan perubahan wujud.

d) **Energi Cahaya**

Energi Cahaya adalah energi yang dihasilkan oleh radiasi gelombang elektromagnetik

e) **Energi Listrik**

Energi Listrik adalah energi yang dihasilkan oleh muatan listrik yang bergerak melalui kabel.

f) **Energi Nuklir**

Energi nuklir adalah energi yang dihasilkan oleh reaksi inti dari bahan radioaktif. Ada dua jenis energi nuklir yaitu energi nuklir fisi dan fusi. Energi nuklir fisi terjadi pada reaktor atom PLTN. Ketika suatu inti berat (misal uranium)

membelah (fisi), energi nuklir cukup besar dibebaskan dalam bentuk energi kalor dan energi cahaya. Energi nuklir juga dibebaskan ketika inti-inti ringan (misalnya hidrogen) bertumbukan pada kelajuan tinggi dan bergabung (fusi). Energi matahari dihasilkan dari suatu reaksi nuklir fusi dimana inti-inti hidrogen bergabung membentuk inti helium.

1.2 Sumber Energi

Sumber Daya Energi ialah semua kekayaan energi yang ada di bumi, baik yang bisa diperbaharui (*renewable*) maupun yang tidak bisa diperbaharui (*unrenewable*) yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan manusia dan kesejahteraan manusia, misalnya: Energi angin, energi air, energi panas bumi, energi nuklir dll. Ada banyak sumber-sumber energi utama dan digolongkan menjadi dua kelompok besar yaitu:

Energi konvensional adalah energi yang diambil dari sumber yang hanya tersedia dalam jumlah terbatas di bumi dan tidak dapat diregenerasi. Sumber-sumber energi ini akan berakhir cepat atau lambat dan berbahaya bagi lingkungan.

Energi terbarukan adalah energi yang dihasilkan dari sumber alami seperti matahari, angin, dan air dan dapat dihasilkan lagi dan lagi. Sumber akan selalu tersedia dan tidak merugikan lingkungan. Sumber-sumber energi Konvensional dan Terbarukan bisa dikonversikan menjadi sumber-sumber energi sekunder, seperti listrik. Listrik berbeda dari sumber-sumber energi lainnya dan dinamakan sumber energi sekunder atau pembawa energi karena dimanfaatkan untuk menyimpan, memindahkan atau mendistribusikan energi dengan nyaman. Sumber energi primer diperlukan untuk menghasilkan energi listrik.

BAB II

MOTOR PEMBAKARAN DALAM

2.1 Motor Pembakaran Dalam Jenis Spark Ignition Engine (Sie)

2.1.1 Motor Bensin 2 Langkah

Motor Bensin 2 langkah artinya dalam satu siklus kerja atau satu putaran poros engkol memerlukan dua langkah piston.

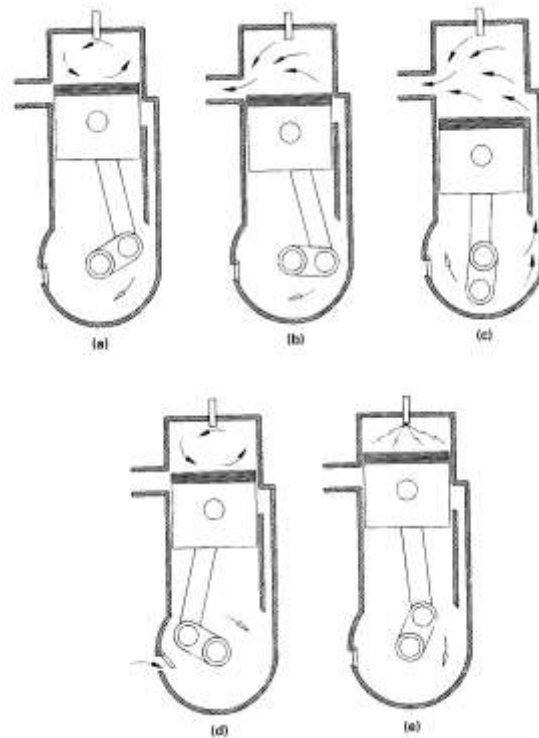
Langkah pertama setelah terjadi pembakaran piston bergerak dari TMA menuju TMB melakukan ekspansi, lubang buang mulai terbuka. Karena tekanan didalam silinder lebih besar dari lingkungan, gas pembakaran keluar melalui lubang buang. Piston terus bergerak menuju TMB lubang buang semakin terbuka dan saluran bilas mulai terbuka. Bersamaan dengan kondisi tersebut tekanan didalam karter mesin lebih besar daripada di dalam silinder sehingga campuran bahan bakar udara menuju silinder melalui saluran bilas sambil melakukan pembilasan gas pembakaran. Proses ini disebut pembilasan, proses ini berhenti pada waktu piston mulai bergerak dari TMB menuju TMA dengan lubang buang dan saluran bilas tertutup.

Langkah kedua setelah proses pembilasan selesai, campuran bahan -bakar masuk kedalam silinder kemudian dikompresi, posisi piston menuju TMA. Sesaat sebelum piston sampai di TMA campuran bahan-bakar dan udara dinyalakan sehingga terjadi proses pembakaran. Siklus kembali lagi ke proses awal seperti diuraikan diatas.

Dari uraian diatas terlihat piston melakukan dua kali langkah yaitu dari :

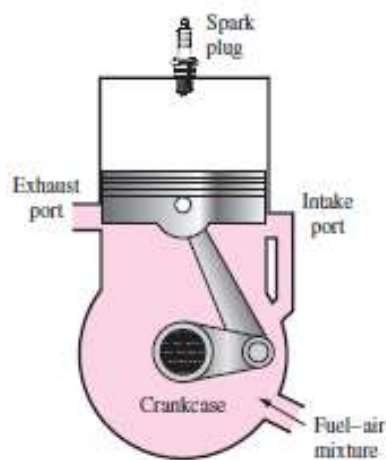
[1] **TMA menuju TMB** ; proses yang terjadi ekspansi, pembilasan (pembuangan dan pengisian)

[2] **TMB menuju TMA** ; proses yang terjadi kompresi, penyalaan pembakaran Keuntungan dan kekurangan siklus 4 langkah dan 2 langkah dapat dilihat dari tabel berikut ini



Gambar 2.1 Siklus kerja motor bensin 2 langkah (a) langkah ekspansi (b) pembuangan gas sisa (c) pembilasan silinder (scavenging) (d) langkah kompresi (e) penyalaan busi

Sumber: Pulkrabek



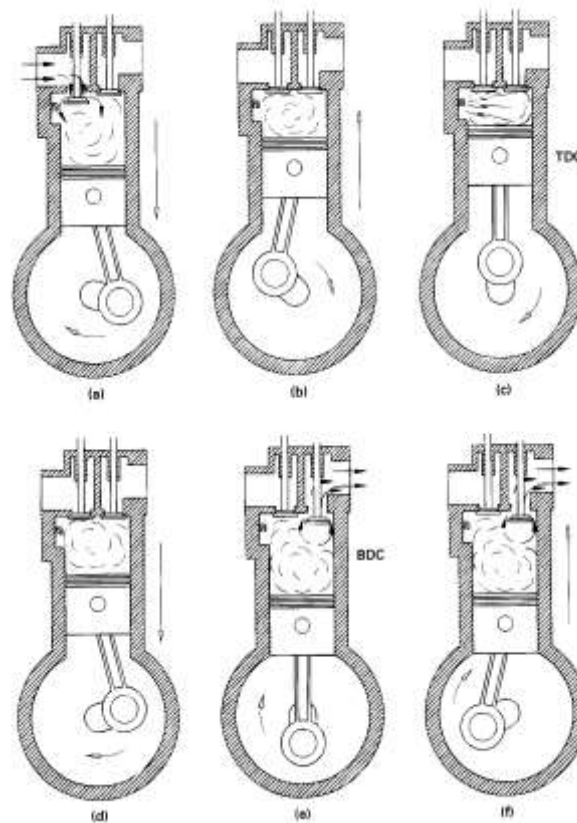
Gambar 2.2 Siklus kerja motor bensin 2 langkah

2.1.2 Motor Bensin 4 Langkah

Motor Bensin 4 langkah artinya dalam satu siklus kerja atau satu putaran poros engkol memerlukan empat langkah piston, yaitu langkah pemasukan, kompresi, kerja, dan pembuangan.

1. Langkah Pemasukan, piston dari TMA menuju TMB, katup masuk membuka sehingga campuran bahan bakar dan udara masuk ke ruang silinder.

2. Langkah Kompresi, piston dari TMB menuju TMA melakukan kompresi campuran bakar dan udara sehingga tekanan meningkat. Sementara kedua katup menutup.
3. Langkah kerja, campuran bahan bakar dan udara yang terkompresi dibakar oleh busi sehingga piston terdorong dan poros engkol berputar.
4. Langkah pembuangan, pada langkah ini katup buang membuka, sementara piston bergerak dari TMA menuju TMB membuang gas hasil pembakaran.



Gambar 2.3 Siklus kerja motor bensin 4 langkah (a) Langkah pemasukan (b) langkah kompresi (c) penyalaan busi (d) langkah kerja (e) pembuangan gas (f) langkah pembuangan (Sumber: Pulkrabek)

2.2. Perhitungan Daya Mesin

Pada motor bakar, daya dihasilkan dari proses pembakaran didalam silinder dan biasanya disebut dengan daya indiator. Daya tersebut dikenakan pada torak yang bekerja bolak balik didalam silinder mesin. Jadi didalam silinder mesin, terjadi perubahan energi dari energi kimia bahan bakar dengan proses pembakaran menjadi energi mekanik pada torak. Daya indikator adalah merupakan sumber tenaga persatuan waktu operasi mesin untuk mengatasi semua beban mesin.

Mesin selama bekerja mempunyai komponen-komponen yang saling berkaitan satu dengan lainnya membentuk kesatuan yang kompak. Komponen-komponen mesin juga

merupakan beban yang harus diatasi daya indikator. Sebagai contoh pompa air untuk sistim pendingin, pompa pelumas untuk sistem pelumasan, kipas radiator, dan lain lain, komponen ini biasa disebut asesoris mesin. Asesoris ini dianggap parasit bagi mesin karena mengambil daya dari daya indikator. Disamping komponen-komponen mesin yang menjadi beban, kerugian karena gesekan antar komponen pada mesin juga merupakan parasit bagi mesin, dengan alasan yang sama dengan asesoris mesin yaitu mengambil daya indikator. Untuk lebih mudah pemahaman dibawah ini dalah perumusan dari masing masing daya. Satuan daya menggunakan HP (hourse power)

$$N_e = N_i - (N_g + N_a) (HP)$$

dengan N_e = adalah daya efektif atau daya poros (HP)

N_i = adalah daya indikator (HP)

N_g = adalah kerugian daya gesek (HP)

N_a = adalah kerugian daya asesoris (HP)

2.2.1 Efisiensi Mesin

Efisiensi mesin menggambarkan tingkat efektifitas mesin bekerja. Secara alamiah setiap proses memerlukan energi, menghasilkan kerja untuk melakukan proses, kemudian ada energi yang harus dibuang. Seperi manusia yang harus makan untuk melakukan aktifitas kerja, selanjutnya secara alamiah harus ada yang dibuang. Apabila proses ini tidak berjalan semestinya, manusia dinyatakan dalam keadaan sakit dan tidak bisa melakukan kerja. Dalam kondisi ini seandainya manusia adalah mesin maka manusia dalam keadaan rusak. Konsep efisiensi menjelaskan bahwa perbandingan antar energi berguna dengan energi yang masuk secara alamiah tidak pernah mencapai 100%. Pada motor bakar ada beberapa definisi dari efisiensi yang menggambarkan kondisi efektifitas mesin bekerja, yaitu

1. Efisiensi termal
2. Efisiensi termal indikator
3. Efisiensi termal efektif
4. Efisiensi mekanik

2.2.2. Efisiensi termal

Efisiensi termal adalah konsep dasar dari efisiensi siklus ideal yang didefinisikan perbandingan antara energi yang berguna dengan energi yang masuk. Energi berguna adalah

pengurangan antara energi masuk dengan energi terbuang. Jadi efisiensi termal dirumuskan dengan persamaan :

$$\eta = \frac{\text{Energi berguna}}{\text{Energi masuk}}$$

2.2.3 Efisiensi termal indikator

Efisiensi termal indikator adalah efisiensi termal dari siklus aktual diagram indikator. Energi berguna dari diagram indikator adalah kerja indikator dan energi masuknya adalah energi dari proses pembakaran perkilogramnya. Perumusannya adalah sebagai berikut

$$\eta_i = \frac{\text{Energi berguna}}{\text{Energi masuk}} = \frac{\text{daya indikator}}{\text{laju energi kalor masuk per kg}} \quad \eta_i = \frac{N_i}{\dot{Q}_m}$$

Karena efisiensi termal indikator adalah pada siklus aktual maka fluidanya adalah bahan bakar dengan udara, sehingga perhitungan energi akor adalah sebagai berikut

$$\dot{Q}_m = \dot{G}_f \times Q_c \quad \eta_i = \frac{N_i}{\dot{Q}_m} \quad \eta_i = \frac{N_i}{\dot{G}_f \times Q_c}$$

$$\eta_i = \frac{P_{\text{rata-rata},i} \times V_d \times n \times \alpha \times z}{\dot{G}_f \times Q_c}$$

Dengan N_i = adalah daya indikator (watt)

\dot{Q}_m = laju kalor masuk per kg bahan bakar (kcal/kg.jam)

\dot{G}_f = laju bahan bakar yang digunakan (kg/jam)

Q_c = Nilai kalor bahan bakar per kcal/kg

2.2.4. Efisiensi termal efektif

Efisiensi termal efektif adalah perbandingan daya poros atau daya efektif dengan laju kalor masuknya. Perumusannya adalah sebagai berikut

$$\eta_e = \frac{\text{daya poros}}{\text{laju energi kalor masuk per kg}} = \frac{N_e}{\dot{Q}_m}$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{G}_f \times Q_c}; \quad \eta_i = \frac{P_{\text{rata-rata},i} \times V_d \times n \times \alpha \times z}{\dot{G}_f \times Q_c}$$

2.2.5. Efisiensi mekanik

Semua beban mesin diatasi dengan sumber energi dari proses pembakaran yang menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik yang terukur pada diagram indikator adalah kerja indikator. Kerja indikator persatuan waktu inilah yang akan ditransfer menjadi kerja poros

persatuan waktu. Adapun besarnya nilai efektifitas dari transfer daya indikator menjadi daya poros adalah efisiensi mekanis. Jadi efisiensi mekanis adalah perbandingan antara daya poros dengan daya indikator dan dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i}$$

2.2.6. Efisiensi volumetrik

Udara yang dihisap masuk silinder selalu banyak mengalami hambatan aliran sehingga aliran udara banyak kehilangan energi, disamping itu udara hisap juga menyerap panas dari saluran hisap terutama pada ujung saluran hisap yang ada katup masuknya. Karena menyerap panas temperatur udara menjadi naik dan menyebabkan massa jenis turun tetapi menaikkan nilai viskositasnya. Dengan kondisi tersebut udara lebih sulit mengalir dengan massa per satuan volumenya juga berkurang. Untuk mendefinisikan jumlah udara yang masuk ke ruang silinder dirumuskan ukuran keefektifan aliran udaran masuk yaitu efisiensi volumetri. Perumusannya adalah sebagai berikut:

$$\eta_v = \frac{\dot{G}_a}{\dot{G}_{ai}} = \frac{\text{jumlah udara masuk kedalam silinder aktual(kg/jam)}}{\text{jumlah udara masuk kedalam silinder ideal(kg/jam)}}$$

$$\eta_v = \frac{\dot{G}_a}{\dot{G}_{ai}} = \frac{\dot{\gamma}_a}{\dot{\gamma}_{ai}} \text{ dengan } \gamma = \text{massa jenis udara (kg/m}^3\text{)}$$

2.2.7. Laju Pemakaian Bahan Bakar Spesifik

Laju pemakaian bahan bakar spesifik atau *specific fuel consumption* (SFC) adalah jumlah bahan bakar (kg) per waktunya untuk menghasikan daya sebesar 1 Hp. Jadi SFC adalah ukuran ekonomi pemakaian bahan bakar. Perhitungan untuk mngetahui SFC adalah:

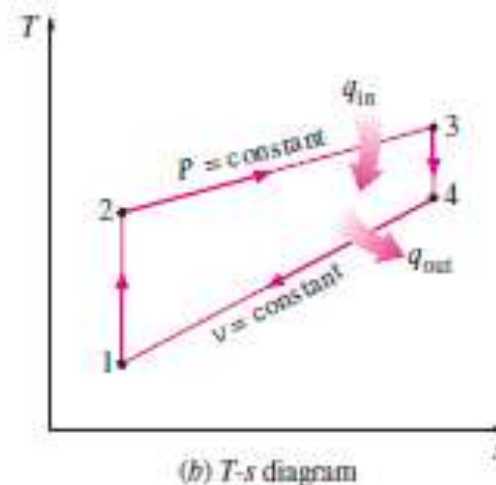
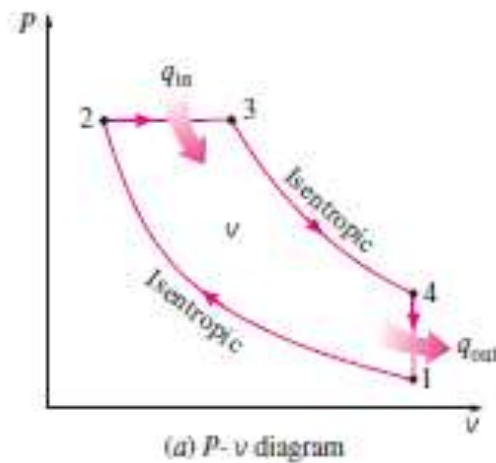
$$SFC_e = \frac{\dot{G}_f}{N_e}$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{G}_f \times Q_c} \quad \eta_e \times Q_c = \frac{N_e}{\dot{G}_f} \quad \frac{1}{\eta_e \times Q_c} = \frac{\dot{G}_f}{N_e} = SFC$$

2.3 Motor Pembakaran Dalam Jeniscompression Ignition Engines (CIE)

Motor diesel disebut dengan motor penyalan kompresi (compression ignition engine) karena penyalan bahan bakarnya diakibatkan oleh suhu kompresi udara dalam ruang bakar.

Siklus Kerja mesin Diesel 4 langkah, pada prinsipnya hampir sama dengan mesin Otto, dimana piston bergerak secara translasi dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB) dan sebaliknya berulang-ulang sebanyak 4 kali dalam satu siklus



Gambar 2.4 Siklus Ideal mesin diesel

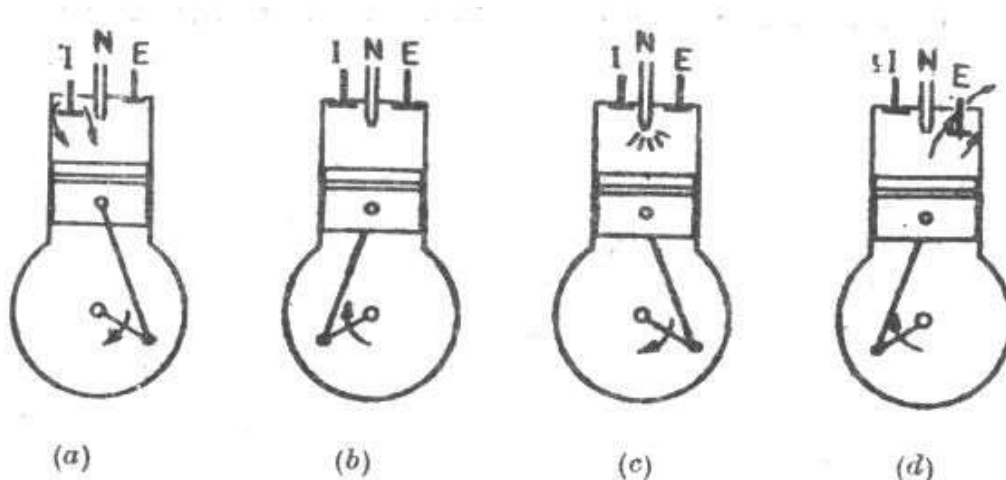
Mesin siklus diesel empat langkah mempunyai langkah-langkah sebagai berikut:

1. *Langkah hisap atau pemuatan.*

Pada langkah ini, katup masuk (I) terbuka dan udara murni disedot ke dalam silinder ketika piston bergerak turun dari TMA ke TMB seperti yang diperlihatkan gambar 2.5a.

2. *Langkah Kompresi.*

Pada langkah ini, kedua katup tertutup dan udara dikompresi ketika piston bergerak keatas dari TMB ke TMA. Dari hasil kompresi, tekanan dan temperatur udara meningkat. Sampai saat ini poros telah berputar satu putaran.



Gambar 2.5. Mesin diesel siklus empat langkah.

3. Langkah ekspansi atau kerja.

Sesaat sebelum piston mencapai TMA, bahan bakar diinjeksikan dalam bentuk semburan sangat halus ke dalam silinder mesin melalui nosel (*N*) yang disebut juga katup injeksi bahan bakar. Pada kondisi ini temperatur udara yang ada di silinder sudah bisa membakar bahan bakar. Hasilnya terjadi kenaikan tiba-tiba tekanan dan temperatur dari produk pembakaran. Bahan bakar diasumsikan terbakar pada tekanan konstan. Karena terjadi kenaikan tekanan, piston di dorong kebawah dengan gaya yang besar. Gas panas tersebut berekspansi karena gerakan turun piston, selama ekspansi ini energi panas diroboh menjadi energi mekanik kerja.

4. Langkah buang.

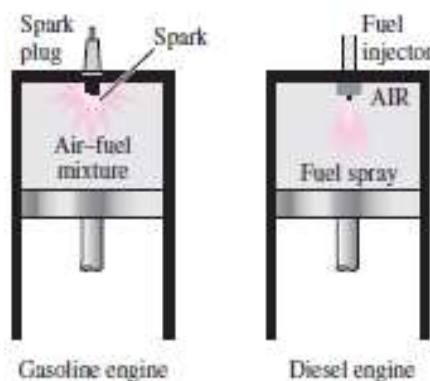
Pada langkah ini, katup buang (*E*) terbuka ketika piston bergerak ke atas. Pergerakan piston ini mendorong keluar produk pembakaran dari dalam silinder melalui katup buang ke atmosfer. Langkah ini menyelesaikan siklus dan silinder mesin siap untuk menghisap udara segar kembali. Gambar 5 memperlihatkan diagram indikator mesin diesel siklus empat langkah. Langkah hisap ditunjukkan oleh garis 1-2, yang terletak dibawah garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini maka udara mengalir ke dalam silinder mesin. Langkah kompresi ditunjukkan oleh garis 2-3 yang memperlihatkan katup masuk tertutup (IVC) sedikit setelah titik 2 (TMB/BDC). Pada akhir langkah, terjadi kenaikan tekanan di dalam silinder. Sedikit sebelum akhir langkah kompresi (TMA/TDC), katup bahan bakar terbuka dan bahan bakar diinjeksikan ke silinder mesin.

Bahan bakar dibakar oleh temperatur tinggi udara bertekanan. Pembakaran menaikkan tekanan dan temperatur produk pembakaran, tetapi tekanan konstan, seperti ditunjukkan oleh garis 3-4. Langkah ekspansi ditunjukkan oleh garis 4-5 dimana katup buang terbuka (EVO)

sedikit sebelum titik 5 (TMB). Sekarang gas asap dibuang ke atmosfer pada garis 5-1 yang terletak diatas garis tekanan atmosfer. Karena perbedaan tekanan ini menyebabkan gas buang mengalir ke luar silinder mesin.

2.4 Perbandingan Mesin Bensin dengan Mesin Diesel

Motor diesel disebut dengan motor penyalan kompresi (compression ignition engine) karena penyalan bahan bakarnya diakibatkan oleh suhu kompresi udara dalam ruang bakar. Sementara, motor bensin disebut motor penyalan busi (spark ignition engine) karena penyalan bahan bakar diakibatkan oleh percikan bunga api listrik dari busi.



Gambar 2.6 Perbandingan mesin bensin dan diesel

Motor diesel dan motor bensin mempunyai beberapa perbedaan. Berikut perbedaan antara mesin diesel dan mesin bensin.

No.	Mesin Bensin	Mesin Diesel
1.	Mesin bensin menarik campuran bensin dan udara selama langkah hisap.	Mesin diesel hanya menarik udara selama langkah hisap.
2	Tekanan pada akhir kompresi sekitar 10 kg/cm ² .	Tekanan pada langkah kompresi sekitar 35 kg/cm ² .
3	Campuran bahan bakar udara dibakar dengan bantuan busi.	Bahan bakar diinjeksi dalam bentuk spray.
4	Pembakaran bahan bakar terjadi pada hampir volume konstan.	Pembakaran terjadi pada hampir tekanan konstan.
5	Mempunyai rasio kompresi sekitar 6 - 10.	Mempunyai rasio kompresi sekitar 15 - 25.
6	Karena rasio kompresi rendah, mesin bensin lebih ringan dan murah	Karena rasio kompresi tinggi maka mesin diesel lebih berat dan mahal

BAB III

TURBIN GAS

3.1 Pengertian 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 atau roda turbin dan bagian turbin yang diam disebut stator atau rumah turbin. Rotor memutar poros daya yang menggerakkan beban (generator listrik, pompa, kompresor atau yang lainnya).

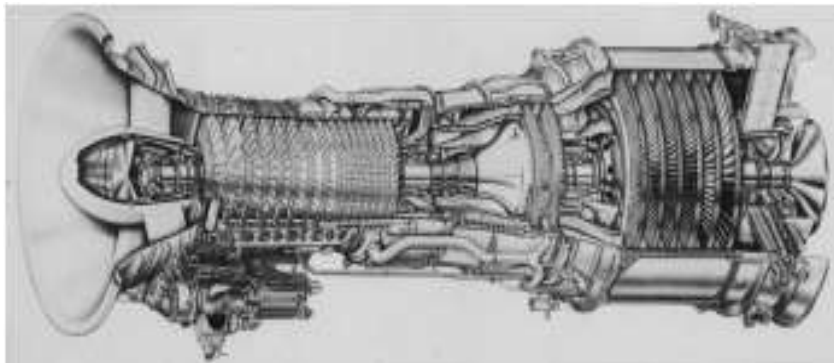
Turbin gas merupakan salah satu komponen dari suatu sistem turbin gas. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas.

Saat ini sistem turbin gas telah banyak diterapkan untuk berbagai keperluan seperti mesin penggerak generator listrik, mesin industri, pesawat terbang dan lainnya.

3.2 Prinsip Kerja Turbin Gas

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (compression) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (combustion) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuai (expansion) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (nozzle)
4. Pembuangan gas (exhaust) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

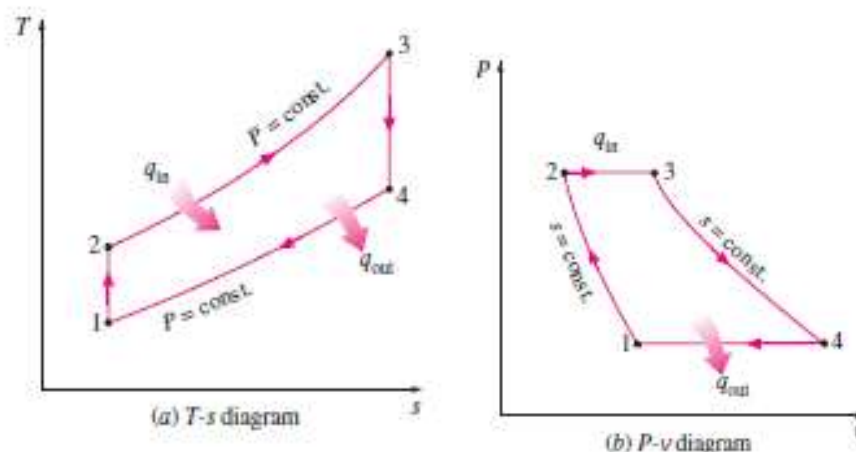


Gambar 3.1 Turbin Gas

Udara masuk ke dalam kompresor melalui saluran masuk udara (inlet). Kompresor ini berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, akibatnya temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara yang telah dikompresi ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar disemprotkan bahan bakar sehingga bercampur dengan udara tadi dan menyebabkan proses pembakaran. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dll. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (exhaust).

3.3 SIKLUS BRAYTON

Turbin gas merupakan suatu mesin yang bekerja mengikuti siklus termodinamik Brayton. Siklus ini merupakan siklus daya termodinamika ideal untuk turbin gas, sehingga saat ini siklus ini yang sangat populer digunakan oleh pembuat mesin turbin dalam analisa untuk *up-grading performance*. Siklus Brayton ini terdiri dari proses kompresi isentropik yang diakhiri dengan proses pelepasan panas pada tekanan konstan. Adapun siklus termodinamikanya pada diagram $p-v$ dan $t-s$ adalah sebagai berikut [gambar 3.2]:



Gambar 3.2 Diagram $p-v$ dan $T-s$

Urutan proses kerja sistem turbin gas [gambar 3.2] adalah :

- 1-2 Proses kompresi adiabatik udara pada kompresor, tekanan udara naik. Kerja yang dibutuhkan oleh kompresor: $W_c = m_a (h_2 - h_1)$

2-3 Proses pembakaran campuran udara dan bahan-bakar pada tekanan konstan, dihasilkan panas pada ruang bakar. Jumlah kalor yang dihasilkan:

$$Q_a = (m_a + m_f) (h_3 - h_2)$$

3-4 Proses ekspansi adiabatik gas pembakaran pada turbin dihasilkan kerja turbin berupa putaran poros dan gaya dorong, tekanan turun. Daya yang dibutuhkan turbin: $W_T = (m_a + m_f) (h_3 - h_4)$

4-1 Proses pembuangan kalor pada tekanan konstan. Jumlah kalor yang dilepas:

$$Q_R = (m_a + m_f) (h_4 - h_1)$$

Dari diagram T - S dapat dilihat setelah proses kompresi pada kompresor temperatur naik yaitu T_2 dari temperatur atmosfer T_1 dan tekanan naik dari p_1 menjadi p_2 , temperatur dan tekanan ini diperlukan untuk proses pembakaran. Setelah bahan bakar disemprotkan dan bercampur dengan udara mampat didalam ruang bakar dan dinyalakan, terjadi proses pembakaran, temperatur naik lagi sampai T_3 . Temperatur T_3 adalah temperatur gas pembakaran yang akan masuk turbin, temperatur ini dibatasi oleh ketahanan material turbin pada suhu tinggi. Setelah proses ekspansi pada turbin, temperatur gas sisa menjadi turun sampai T_4 dan temperatur gas sisa ini masih tinggi diatas temperatur T_1 .

3.4 Klasifikasi Turbin Gas

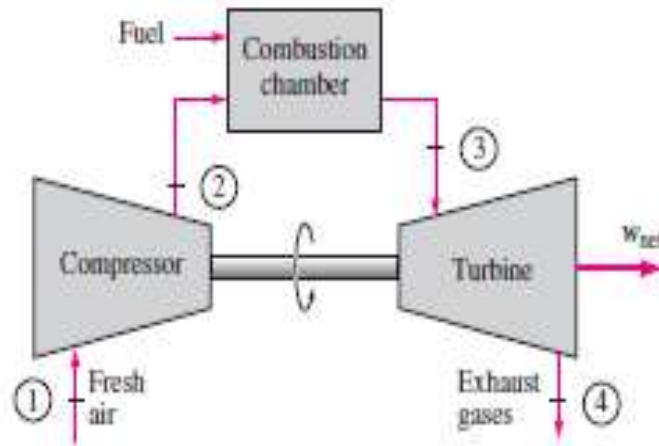
Turbin gas dapat dibedakan berdasarkan siklusnya, konstruksi poros dan lainnya. Menurut siklusnya turbin gas terdiri dari:

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

3.4.1 Turbin gas siklus terbuka (Open cycle)

Pada sistem turbin gas terbuka [gambar 3.3], fluida kerja akan keluar masuk sistem yaitu udara lingkungan masuk kompresor dan gas bekas keluar turbin ke lingkungan. Ruang bakar menjadi satu dengan sistem turbin gas dan bahan bakar yang digunakan terbatas yaitu hanya bahan bakar cair dan gas. Bahan bakar tersebut sebelum digunakan sudah dimurnikan, sehingga tidak mengandung unsur-unsur yang merugikan.



Gambar 3.3. Bagan kerja turbin gas siklus terbuka

Permasalahan turbin gas sistem terbuka terfokus pada proses pendinginan ruang bakar dan sudu-sudu turbin. Disamping itu, karena gas pembakaran langsung bersinggungan dengan material turbin, permasalahan korosi dan abarasi pada sudu turbin, menjadi sangat penting, jika hal ini diabaikan akan berakibat fatal dan sangat merugikan, yaitu sudu-sudu turbin bisa bengkok atau patah. Kalau hal tersebut terjadi, daya turbin menurun, dan secara keseluruhan efisien kerja menjadi rendah.

Turbin gas sistem terbuka banyak dipakai untuk mesin pesawat terbang, karena bentuknya lebih simpel, ringan dan tidak banyak memakan tempat, hal ini cocok dengan persyaratan turbin gas untuk pesawat terbang.

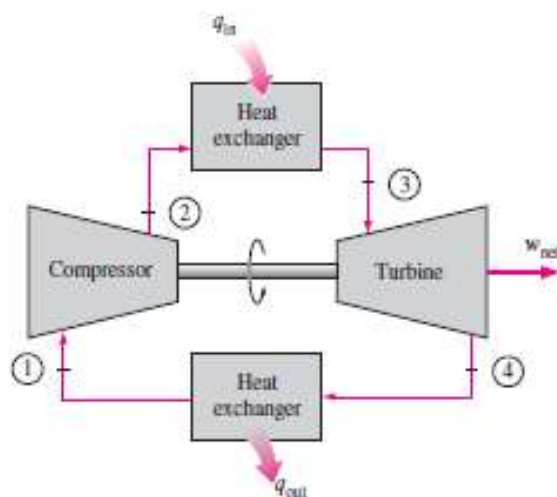
Bahan bakar padat tidak disarankan untuk digunakan pada sistem turbin gas terbuka langsung, karena hasil pembakaran banyak mengandung partikel yang bersifat korosi terhadap material turbin, yang dapat merusak sudu turbin. Kendala tersebut dapat diatasi dengan memisahkan ruang bakar dengan saluran fluida kerja, dengan kata lain, fluida kerja masuk turbin dikondisikan tidak mengandung gas hasil pembakaran. Untuk keperluan tersebut, dibuat turbin gas sistem terbuka tak langsung. Dengan sistem ini, proses pembakaran berlangsung sendiri di dalam ruang bakar yang terpisah dengan saluran fluida kerja yang akan masuk turbin. Energi panas dari proses pembakaran akan ditransfer ke fluida kerja secara langsung atau menggunakan alat penukar kalor.

Model transfer energi panas dari ruang bakar ke fluida kerja secara langsung adalah sebagai berikut. Pipa-pipa yang berisi fluida kerja udara mampat dari kompresor dilewatkan ke ruang bakar atau dapur. Panas dari proses pembakaran ditransfer secara langsung ke fluida kerja didalam pipa-pipa, temperatur fluida akan naik sampai nilai tertentu sebelum masuk turbin.

Untuk model transfer panas dengan penukar kalor, banyak diaplikasikan pada turbin gas berbahan bakar nuklir. Ruang bakar berbahan bakar nuklir sering disebut dengan reaktor. Di dalam reaktor nuklir terjadi reaksi fusi yang menghasilkan panas yang tinggi, panas yang tinggi tersebut ditransfer ke fluida yang sekaligus berfungsi sebagai pendingin reaktor, fluida tersebut sering diistilahkan sebagai fluida primer. Kemudian, fluida primer bersuhu tinggi dialirkan ke alat penukar kalor. Didalam alat penukar kalor terdapat pipa-pipa berisi fluida kerja bersuhu rendah, untuk fluida ini sering disebut sebagai fluida sekunder. Dengan kondisi tersebut, terjadi tranfer panas dari fluida primer bersuhu tinggi ke fluida sekunder bersuhu rendah.

3.4.2 Turbin Gas Siklus Tertutup (Close cycle)

Sistem turbin gas tertutup langsung banyak digunakan untuk aplikasi tubin gas dengan bahan bakar nuklir [gambar 6.5]. Fluida kerja yang paling cocok adalah helium. Proses kerja dari sistem tersebut adalah sebagai berikut. Helium tekanan tinggi dari kompresor dimasukan reaktor untuk dipanasi dan sekaligus untuk pendinginan reaktor. Setelah itu, helium berekspansi diturbin dengan melepaskan sebagian besar energinya. Energi tersebut diubah pada sudu-sudu turbin menjadi putaran poros turbin dan langsung menggerakkan kompresor ataupun beban lainnya. Helium keluar turbin, tekanannya sudah menurun, tetapi masih bertemperatur tinggi. Helium bertemperatur tinggi harus didinginkan sebelum masuk kompresor, untuk keperluan tersebut, dipasang penukar kalor. Selanjutnya, helium dingin masuk kompresor lagi untuk dikompresi lagi.



Gambar 3.4. Bagan kerja turbin gas siklus tertutup

3.5 KOMPONEN UTAMA TURBIN GAS

1. Saluran Masuk Udara (Air Inlet Section)

Berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor.

2. Compressor Section

Komponen utama pada bagian ini adalah aksial 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.

3. Ruang Bakar (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.

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.

5. Exhaust Section

Exhaust section adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas.

BAB IV

MOTOR PEMBAKARAN LUAR

4.1 Sistem Pembangkit Daya Uap

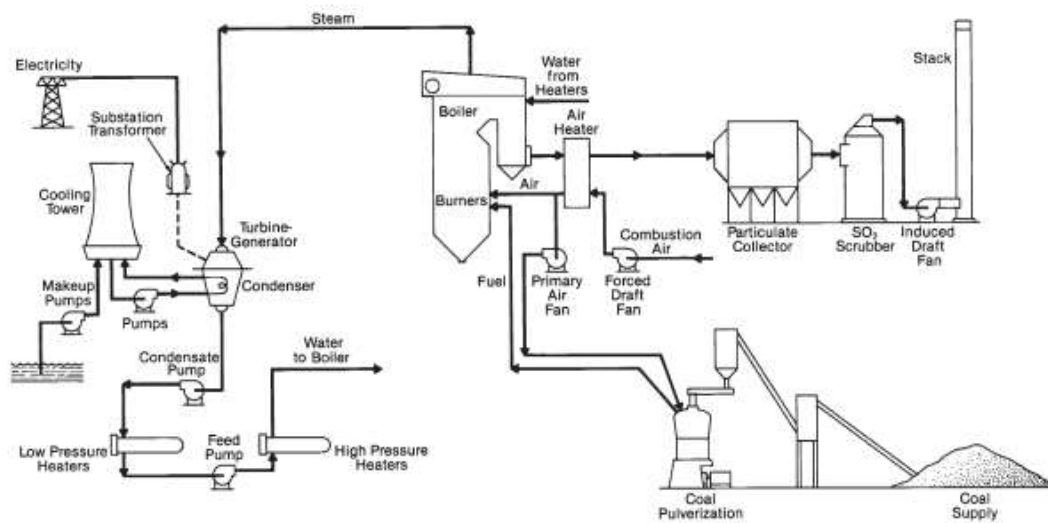
Sistem Pembangkit Daya Uap mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik dari uap kering.

Proses konversi energi pada sistem pembangkit daya uap berlangsung melalui 3 tahapan, yaitu:

1. Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi.
2. Kedua, energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.
3. Ketiga, energi mekanik diubah menjadi energi listrik.

Sistem pembangkit daya uap menggunakan fluida kerja air uap yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut:

1. Air diisikan ke *boiler* hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan pemindah panas. Didalam *boiler* air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap.
2. Uap hasil produksi *boiler* dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.
3. Generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal output generator.
4. Uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi *boiler*. Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dan berulang-ulang.

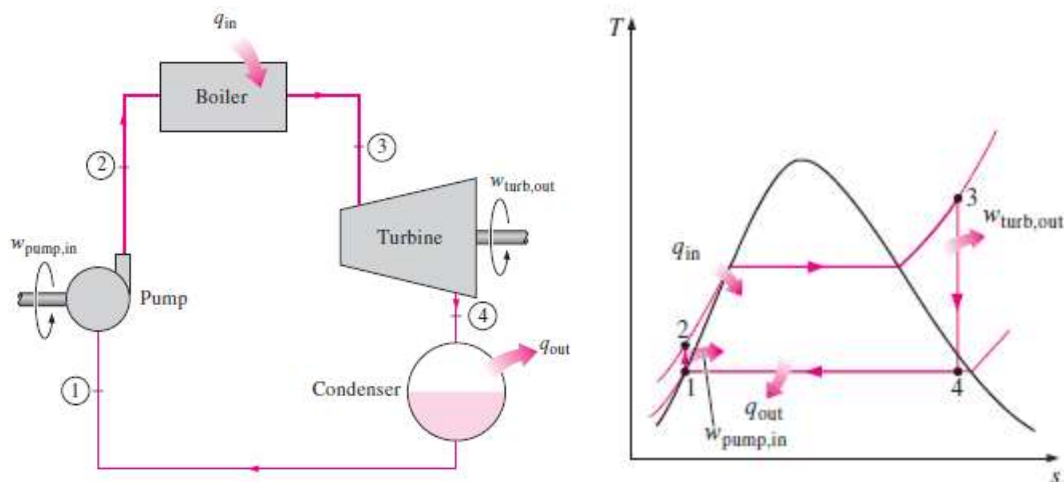


Gambar 4.1 Skema kerja Sistem Pembangkit Tenaga Uap

4.2. Siklus Rankine

Siklus kerja yang digunakan pada PLTU adalah siklus *rankine*, ciri utama siklus *rankine* adalah fluida kerja yang digunakan yaitu air. Siklus *rankine* merupakan siklus ideal untuk pembangkit daya uap.

Pada siklus *rankine* ideal sederhana terdiri dari 4 proses yang dapat dilihat pada gambar diagram T-s berikut:



Gambar 4.2 Skema kerja siklus Rankine

Adapun urutan siklus dari Gambar 4.2 adalah:

- 1 – 2 Fluida kerja/air dipompa dari tekanan rendah ke tekanan tinggi dan pada proses ini fluida kerja masih berfase cair sehingga tidak memerlukan input tenaga yang

terlalu besar. Proses ini dinamakan proses kompresi isentropik karena pada saat di pompa, secara ideal tidak ada perubahan entropi yang terjadi.

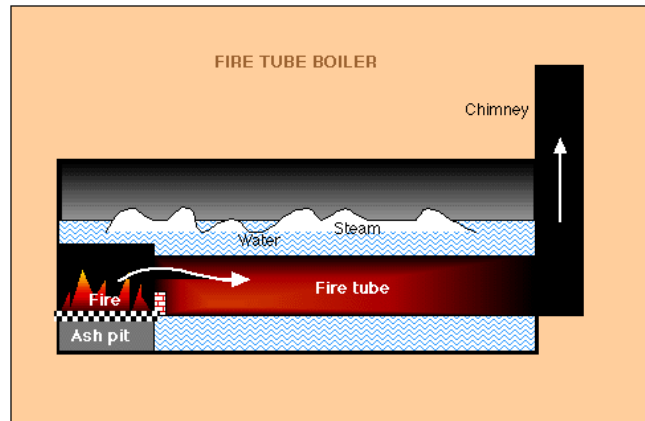
- 2 – 3 Air bertekanan tinggi tersebut masuk ke *boiler* untuk mengalami proses selanjutnya, yaitu dipanaskan secara isobarik (tekanan konstan). Sumber panas didapat dari proses pembakaran. Di *boiler* air mengalami perubahan fase cair dan uap serta 100% uap kering.
- 3 – 4 Proses ini terjadi pada turbin uap. Uap kering dari *boiler* masuk ke turbin dan mengalami proses secara isentropik. Energi yang tersimpan di dalam uap air di konversi menjadi energi gerak pada turbin.
- 4 – 1 Uap air yang keluar dari turbin uap masuk ke kondensor dan mengalami kondensasi secara isobarik. Uap air diubah fasenya menjadi cair kembali sehingga dapat digunakan kembali pada proses siklus.

4.3 Jenis Boiler

Bagian ini menerangkan tentang berbagai jenis boiler: *Fire tube boiler*, *Water tube boiler*, Paket boiler, *Fluidized bed combustion boiler*, *Atmospheric fluidized bed combustion boiler*, *Pressurized fluidized bed combustion boiler*, *Circulating fluidized bed combustion boiler*, *Stoker fired boiler*, *Pulverized fuel boiler*, *Boiler pemanas limbah (Waste heat boiler)* dan and Pemanas fluida termis.

4.3.1 Fire Tube Boiler

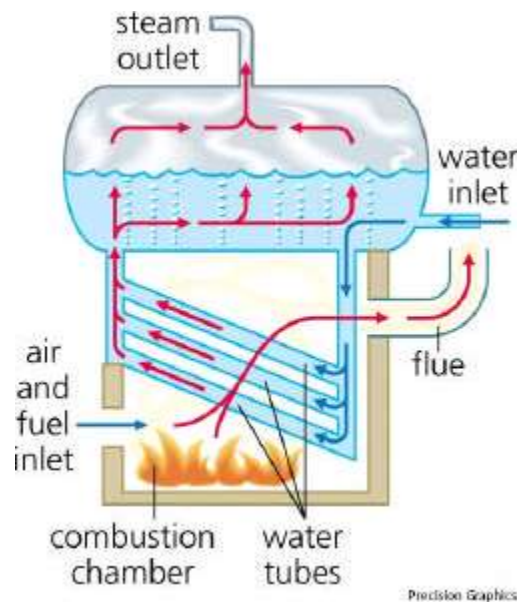
Pada *fire tube boiler*, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam *shell* untuk dirubah menjadi steam. *Fire tube boilers* biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, *fire tube boilers* kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boilers* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar *fire tube boilers* dikonstruksi sebagai “paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



Gambar 4.3. *Fire tube Boiler*

4.3.2 *Water Tube Boiler*

Pada *water tube boiler*, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga. *Water tube boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas steam antara 4.500 – 12.000 kg/jam, dengan tekanan sangat tinggi. Banyak *water tube boilers* yang dikonstruksi secara paket jika digunakan bahan bakar minyak bakar dan gas. Untuk *water tube* yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket.

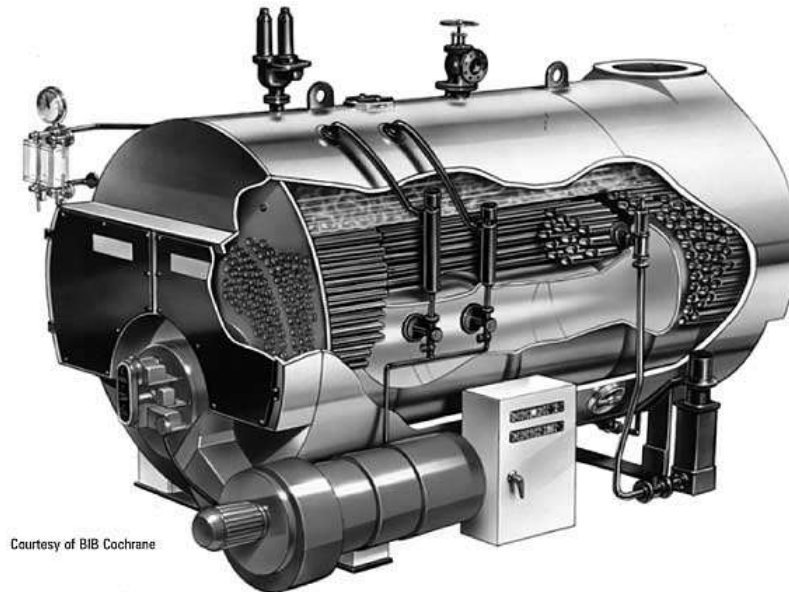


Gambar 4.4 Diagram sederhana *water tube boiler*

4.3.3 *Paket Boiler*

Disebut boiler paket sebab sudah tersedia sebagai paket yang lengkap. Pada saat dikirim ke pabrik, hanya memerlukan pipa steam, pipa air, suplai bahan bakar dan

sambungan listrik untuk dapat beroperasi. Paket boiler biasanya merupakan tipe shell and tube dengan rancangan *fire tube* dengan transfer panas baik radiasi maupun konveksi yang tinggi.



Gambar 4.5 Jenis paket boiler

4.3.4 Boiler Pembakaran dengan *Fluidized Bed* (FBC)

Pembakaran dengan fluidized bed (FBC) muncul sebagai alternatif yang memungkinkan dan memiliki kelebihan yang cukup berarti dibanding sistem pembakaran yang konvensional dan memberikan banyak keuntungan – rancangan boiler yang kompak, fleksibel terhadap bahan bakar, efisiensi pembakaran yang tinggi dan berkurangnya emisi polutan yang merugikan seperti SO_x dan NO_x.

Bahan bakar yang dapat dibakar dalam boiler ini adalah batubara, barang tolakan dari tempat pencucian pakaian, sekam padi, bagas & limbah pertanian lainnya. Boiler fluidized bed memiliki kisaran kapasitas yang luas yaitu antara 0.5 T/jam sampai lebih dari 100 T/jam.

4.3.5 *Atmospheric Fluidized Bed Combustion* (AFBC) Boiler

Kebanyakan boiler yang beroperasi untuk jenis ini adalah *Atmospheric Fluidized Bed Combustion* (AFBC) Boiler. Alat ini hanya berupa *shell* boiler konvensional biasa yang ditambah dengan sebuah fluidized bed combustor. Sistem seperti telah dipasang digabungkan dengan *water tube boiler*/ boiler pipa air konvensional. Batubara dihancurkan menjadi ukuran 1 – 10 mm tergantung pada tingkatan batubara dan jenis pengumpan udara ke ruang pembakaran.

Udara atmosfer, yang bertindak sebagai udara fluidisasi dan pembakaran, dimasukkan dengan tekanan, setelah diberi pemanasan awal oleh gas buang bahan bakar. Pipa dalam *bed* yang membawa air pada umumnya bertindak sebagai *evaporator*. Produk gas hasil pembakaran melewati bagian *super heater* dari boiler lalu mengalir ke *economizer*, ke pengumpul debu dan pemanas awal udara sebelum dibuang ke atmosfer.

4.3.6 Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) Boiler

Pada tipe *Pressurized Fluidized bed Combustion* (PFBC), sebuah kompresor memasok udara *Forced Draft* (FD), dan pembakarnya merupakan tangki bertekanan. Laju panas yang dilepas dalam *bed* sebanding dengan tekanan *bed* sehingga *bed* yang dalam digunakan untuk mengekstraksi sejumlah besar panas. Hal ini akan meningkatkan efisiensi pembakaran dan peyerapan sulfur dioksida dalam *bed*. Steam dihasilkan didalam dua ikatan pipa, satu di *bed* dan satunya lagi berada diatasnya. Gas panas dari cerobong menggerakkan turbin gas pembangkit tenaga. Sistem PFBC dapat digunakan untuk pembangkitan kogenerasi (*steam* dan listrik) atau pembangkit tenaga dengan siklus gabungan/ *combined cycle*. Operasi *combined cycle* (turbin gas & turbin uap) meningkatkan efisiensi konversi keseluruhan sebesar 5 hingga 8 persen.

4.3.7 Atmospheric Circulating Fluidized Bed Combustion Boilers (CFBC)

Dalam sistem sirkulasi, parameter *bed* dijaga untuk membentuk padatan melayang dari *bed*. Padatan diangkat pada fase yang relatif terlarut dalam pengangkat padatan, dan sebuah *down-comer* dengan sebuah siklon merupakan aliran sirkulasi padatan. Tidak terdapat pipa pembangkit steam yang terletak dalam *bed*. Pembangkitan dan pemanasan berlebih steam berlangsung di bagian konveksi, dinding air, pada keluaran pengangkat/ *rise* daripada boiler AFBC, untuk penerapannya di industri memerlukan lebih dari 75 – 100 T/jam steam. Untuk unit yang besar, semakin tinggi karakteristik tungku boiler CFBC akan memberikan penggunaan ruang yang semakin baik, partikel bahan bakar lebih besar, waktu tinggal bahan penyerap untuk pembakaran yang efisien dan penangkapan SO₂ yang semakin besar pula, dan semakin mudah penerapan teknik pembakaran untuk pengendalian NO_x daripada pembangkit steam AFBC.

4.3.8 Pulverized Fuel Boiler

Kebanyakan boiler stasiun pembangkit tenaga yang berbahan bakar batubara menggunakan batubara halus, dan banyak boiler pipa air di industri yang lebih besar juga menggunakan batubara yang halus. Teknologi ini berkembang dengan baik dan diseluruh

dunia terdapat ribuan unit dan lebih dari 90 persen kapasitas pembakaran batubara merupakan jenis ini. Untuk batubara jenis bituminous, batubara digiling sampai menjadi bubuk halus, yang berukuran +300 micrometer (μm) kurang dari 2 persen dan yang berukuran dibawah 75 microns sebesar 70-75 persen. Harus diperhatikan bahwa bubuk yang terlalu halus akan memboroskan energi penggilingan. Sebaliknya, bubuk yang terlalu kasar tidak akan terbakar sempurna pada ruang pembakaran dan menyebabkan kerugian yang lebih besar karena bahan yang tidak terbakar. Batubara bubuk dihembuskan dengan sebagian udara pembakaran masuk menuju plant boiler melalui serangkaian nosel *burner*. Udara sekunder dan tersier dapat juga ditambahkan. Pembakaran berlangsung pada suhu dari 1300 - 1700 °C, tergantung pada kualitas batubara. Waktu tinggal partikel dalam *boiler* biasanya 2 hingga 5 detik, dan partikel harus cukup kecil untuk pembakaran yang sempurna.

Sistim ini memiliki banyak keuntungan seperti kemampuan membakar berbagai kualitas batubara, respon yang cepat terhadap perubahan beban muatan, penggunaan suhu udara pemanas awal yang tinggi dll. Salah satu sistim yang paling populer untuk pembakaran batubara halus adalah pembakaran tangensial dengan menggunakan empat buah *burner* dari keempat sudut untuk menciptakan bola api pada pusat tungku.

BAB V MESIN FLUIDA

5.1 TURBIN AIR

Air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah didapat, karena pada air tersimpan energi potensial (pada air jatuh) dan energi kinetik (pada air mengalir). Tenaga air (*Hydropower*) adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir. Energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Pemanfaatan energi air banyak dilakukan dengan menggunakan kincir air atau turbin air yang memanfaatkan adanya suatu air terjun atau aliran air di sungai. Sejak awal abad 18 kincir air banyak dimanfaatkan sebagai penggerak penggilingan gandum, penggergajian kayu dan mesin tekstil. Memasuki abad 19 turbin air mulai dikembangkan.

Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya head dan debit air. Dalam hubungan dengan reservoir air maka head adalah beda ketinggian antara muka air pada reservoir dengan muka air keluar dari kincir air/turbin air. Total energi yang tersedia dari suatu reservoir air adalah merupakan energi potensial air yaitu :

$$E = mgh$$

Dengan,

m adalah massa air

h adalah head (m)

g adalah percepatan gravitasi $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

Daya merupakan energi tiap satuan waktu $\left(\frac{E}{t}\right)$, sehingga persamaan dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{E}{t} = \frac{m}{t} gh$$

Dengan mensubstitusikan P terhadap $\left(\frac{E}{t}\right)$ dan mensubstitusikan ρQ terhadap $\left(\frac{m}{t}\right)$ maka :

$$P = \rho Qgh$$

dengan

P adalah daya (watt) yaitu

Q adalah kapasitas aliran $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

ρ adalah densitas air $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Selain memanfaatkan air jatuh hydropower dapat diperoleh dari aliran air datar. Dalam hal ini energi yang tersedia merupakan energi kinetik

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

dengan

v adalah kecepatan aliran air $\left(\frac{m}{s}\right)$

Daya air yang tersedia dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2}\rho Qv^2$$

atau dengan menggunakan persamaan kontinuitas $Q = Av$ maka

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

dengan

A adalah luas penampang aliran air (m^2)

5.2 Macam-Macam Turbin Air

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk pembangkit tenaga listrik.. Turbin air mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis. Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi.

Tabel 5.1 Pengelompokan Turbin

	high head	medium head	low head
impulse turbines	Pelton Turgo	cross-flow multi-jet Pelton Turgo	cross-flow
reaction turbines		Francis	propeller Kaplan

5.2.1 Turbin Impuls

Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik pada nozle. Air keluar nozle yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impulse). Akibatnya roda turbin akan berputar. Turbin impuls adalah turbin tekanan sama karena aliran air yang keluar dari nosel tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan.

1 Turbin Pelton

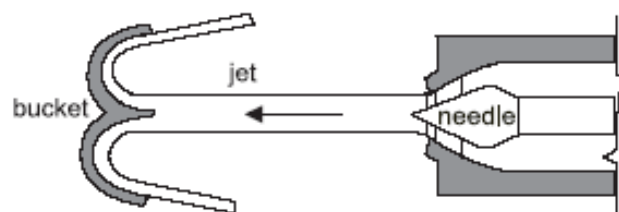


Gambar 5.1 Turbin Pelton

Turbin pelton merupakan turbin impuls. Turbin Pelton terdiri dari satu set sudu jalan yang diputar oleh pancaran air yang disemprotkan dari satu atau lebih alat yang disebut nosel. Turbin Pelton adalah salah satu dari jenis turbin air yang paling efisien. Turbin Pelton adalah turbin yang cocok digunakan untuk head tinggi.

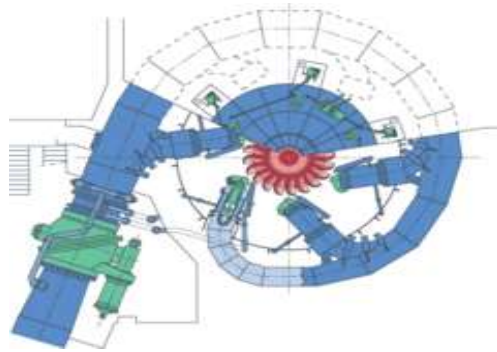


Gambar 5.2. Nozle



Gambar 5.3. Nozle

Bentuk sudu turbin terdiri dari dua bagian yang simetris. Sudu dibentuk sedemikian sehingga pancaran air akan mengenai tengah-tengah sudu dan pancaran air tersebut akan berbelok ke kedua arah sehingga bisa membalikkan pancaran air dengan baik dan membebaskan sudu dari gaya-gaya samping. Untuk turbin dengan daya yang besar, sistem penyemprotan airnya dibagi lewat beberapa nosel. Dengan demikian diameter pancaran air bisa diperkecil dan ember sudu lebih kecil.

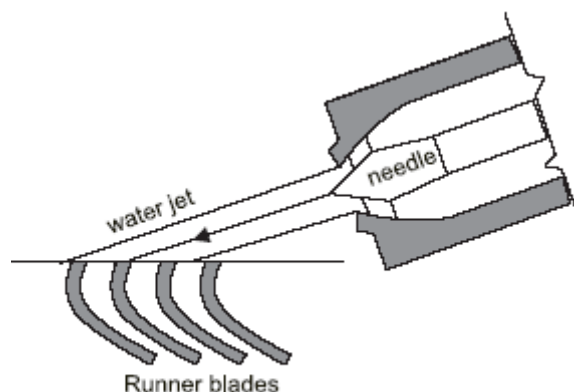


Gambar 5.4 Turbin Pelton dengan banyak nosle

Turbin Pelton untuk pembangkit skala besar membutuhkan head lebih kurang 150 meter tetapi untuk skala mikro head 20 meter sudah mencukupi.

2 Turbin Turgo

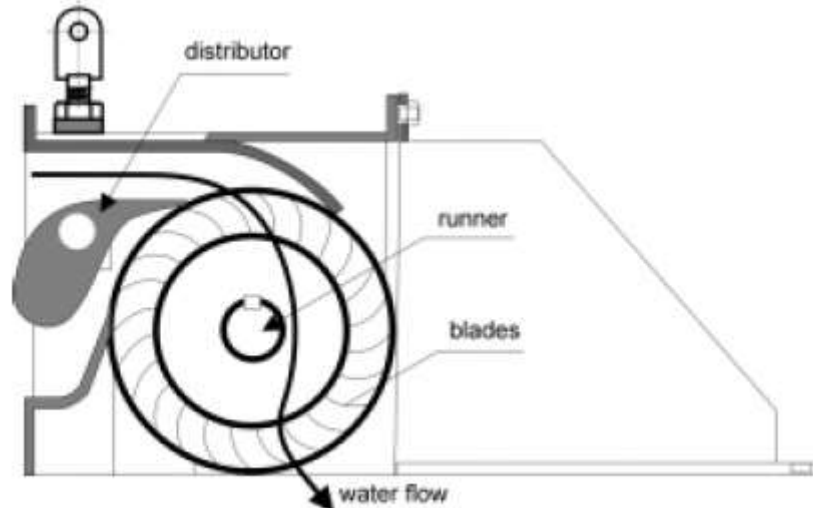
Turbin Turgo dapat beroperasi pada head 30 s/d 300 m. Seperti turbin pelton turbin turgo merupakan turbin impulse, tetapi sudunya berbeda. Pancaran air dari nosle membentur sudu pada sudut 20° . Kecepatan putar turbin turgo lebih besar dari turbin Pelton. Akibatnya dimungkinkan transmisi langsung dari turbin ke generator sehingga menaikkan efisiensi total sekaligus menurunkan biaya perawatan.



Gambar 5.5. Sudu turbin Turgo dan nosle

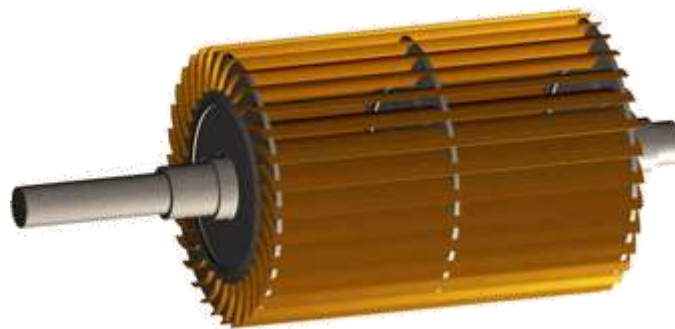
3 Turbin Crossflow

Salah satu jenis turbin impuls ini juga dikenal dengan nama Turbin Michell-Banki yang merupakan penemunya. Selain itu juga disebut Turbin Osberger yang merupakan perusahaan yang memproduksi turbin crossflow. Turbin crossflow dapat dioperasikan pada debit 20 litres/sec hingga $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ dan head antara 1 s/d 200 m.



Gambar 5.6. Turbin Crossflow

Turbin crossflow menggunakan nozle persegi panjang yang lebarnya sesuai dengan lebar runner. Pancaran air masuk turbin dan mengenai sudu sehingga terjadi konversi energi kinetik menjadi energi mekanis. Air mengalir keluar membentur sudu dan memberikan energinya (lebih rendah dibanding saat masuk) kemudian meninggalkan turbin. Runner turbin dibuat dari beberapa sudu yang dipasang pada sepasang piringan paralel.



Gambar 5.7. Turbin Crossflow

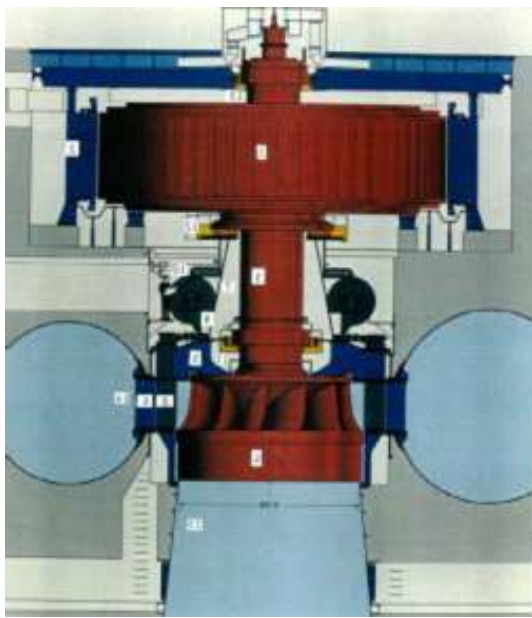
5.2.2 Turbin Reaksi

Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja

berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Runner turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.

1. Turbin Francis

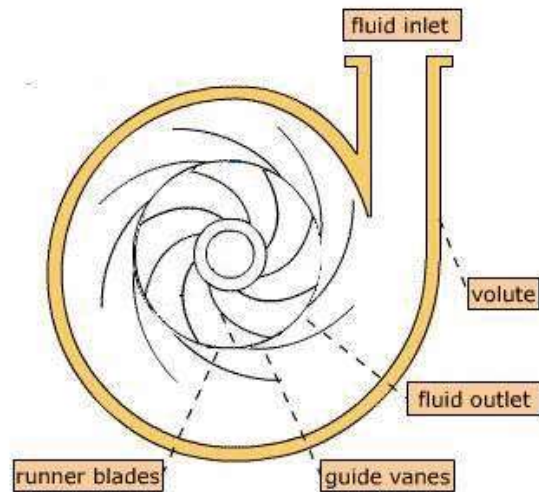
Turbin Francis merupakan salah satu turbin reaksi. Turbin dipasang diantara sumber air tekanan tinggi di bagian masuk dan air bertekanan rendah di bagian keluar. Turbin Francis menggunakan sudu pengarah. Sudu pengarah mengarahkan air masuk secara tangensial. Sudu pengarah pada turbin Francis dapat merupakan suatu sudu pengarah yang tetap ataupun sudu pengarah yang dapat diatur sudutnya. Untuk penggunaan pada berbagai kondisi aliran air penggunaan sudu pengarah yang dapat diatur merupakan pilihan yang tepat.



Keterangan gambar ;

1. Generator Rotor
2. Generator Stator
3. Turbine Shaft
4. Runner
5. Turbine Head Cover
6. Stay Ring Discharge Ring
7. Supporting Cone
8. Guide Vane
9. Operating Ring
10. Guide Vane Servomotor
11. Lower Guide Bearing
12. Thrust Bearing
13. Upper Guide Bearing
14. Spiral Case
15. Draft Tube Cone

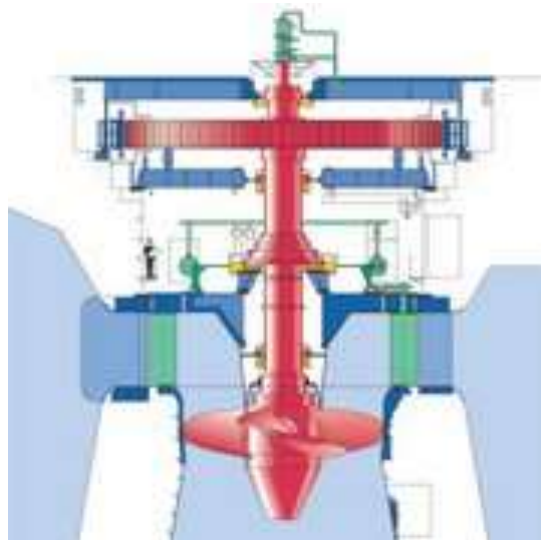
Gambar 5.8. Turbin Francis



Gambar 5.9. Sketsa Turbin Francis

2 Turbin Kaplan & Propeller

Turbin Kaplan dan propeller merupakan turbin rekasi aliran aksial. Turbin ini tersusun dari propeller seperti pada perahu.. Propeller tersebut biasanya mempunyai tiga hingga enam sudu.



Gambar 5.10. Turbin Kaplan

BAB VI

MESIN KONVERSI ENERGI NON-KONVENSIONAL

6.1 Pembangkit Daya Uap Tenaga Nuklir

Reaksi nuklir merupakan reaksi pembelahan inti atom. Umumnya reaksi nuklir terdiri atas dua jenis, yaitu reaksi fisi dan fusi. Reaksi fisi merupakan pecahnya inti atom menjadi inti-inti yang lebih kecil. Reaksi nuklir jenis fisi dapat terjadi di dalam teras reaktor nuklir yang dapat dikendalikan, reaksi ini juga dapat terjadi pada ledakan bom nuklir yang tidak terkendali. Sementara reaksi fusi merupakan reaksi penggabungan inti-inti atom yang kecil menjadi inti atom yang lebih besar.

6.1.1 Komponen Reaktor Nuklir

1. Bahan Bakar Nuklir

2. Moderator

3. Reflektor

Reflektor dipasang di sekeliling teras reaktor dengan maksud agar neutron yang dihamburkan keluar dapat dipantulkan kembali ke teras reaktor. Oleh karena itu, kebocoran neutron dapat dikurangi

4. Batang Kendali

Untuk menjalankan reaktor nuklir yang baik, diperlukan reaksi pembelahan berantai yang dapat dikendalikan secara teliti. Syarat utama bagi pengendalian reaktor adalah bahwa keadaan kritis dan nyaris superkritis dapat tercapai dengan lancar dan teratur. Kemudian, kenaikan daya harus dapat tercapai dengan kecepatan yang teratur pula, sedangkan pada setiap tingkat daya hendaknya dapat tercapai suatu keadaan yang stabil. Syarat lain adalah bahwa setiap keadaan transien (perubahan cepat yang tidak terkendali dalam reaktor) dapat dikoreksi dengan penggunaan mekanik pengendalian. Akhirnya, dikehendaki pula bahwa reaktor pada setiap waktu dapat dihentikan (*shutdown*) atau dapat dijalankan (*startup*)

Pengendalian reaktor biasanya dapat dilakukan dengan mengatur banyaknya penyerapan neutron. Dalam tipe-tipe reaktor tertentu, pengendalian itu dilakukan dengan mengatur pembangkitan neutron, misalnya dalam tipe bahan bakar cair dengan mengubah konsentrasi bahan bakar.

Prinsip kerja dari batang kendali adalah dengan memasukkan dan mengeluarkan batang kendali dari teras reaktor. Jika batang kendali dimasukkan ke dalam teras reaktor,

neutron akan diserap sehingga populasi neutron berkurang. Dengan demikian, daya reaktor menjadi semakin rendah. Sebaliknya jika batang kendali dikeluarkan dari reaktor, populasi neutron semakin banyak dan daya reaktor menjadi semakin tinggi. Penggunaan batang kendali ini berkaitan langsung dengan perubahan daya reaktor.

4 Pendingin

Suatu zat pendingin diperlukan untuk menghindari terjadinya suhu yang berlebihan dalam bejana reaktor. Sifat-sifat yang harus dimiliki oleh zat pendingin adalah sebagai berikut:

1. Mempunyai penyerapan neutron yang rendah
2. Mempunyai perpindahan panas yang baik
3. Dapat menggunakan daya pompa yang rendah
4. Mempunyai titik beku yang rendah
5. Mempunyai titik didih yang tinggi
6. Stabil dalam lingkungan radiasi dan suhu tinggi
7. Tidak korosi
8. Aman dalam penanganan

Berbagai bahan yang dapat dipergunakan sebagai pendingin adalah

1. Bentuk gas: udara, helium, CO₂, uap
2. Bentuk cair: Air ringan (H₂O), air berat (D₂O)
3. Logam cair: Na, NaK

Air ringan merupakan bahan pendingin yang paling banyak dalam reaktor nuklir,

5 Selongsong Bahan Bakar

Bahan bakar nuklir dibungkus dengan selongsong logam. Apabila unsur radioaktif hasil fisi lepas dari bahan bakar maka selongsong akan menahan unsur tersebut. Fungsi utama dari selongsong ini adalah untuk mengungkung unsur-unsur hasil fisi sehingga unsur-unsur tersebut tidak akan terlarut dalam air pendingin dan tidak keluar dari teras reaktor.

6 Tangki Reaktor

Tangki reaktor merupakan tempat dari semua komponen reaktor nuklir. Tangki reaktor ini berbentuk tangki biasa dengan ukuran sangat besar dan terbuat dari baja tahan karat. Pada bagian bawah tangki terpasang inti reaktor.

7 Penahan Radiasi

Tangki reaktor disangga oleh bangunan pengungkung yang berupa gedung reaktor. Gedung reaktor terbuat dari pelat baja dan beton berat dengan ketebalan sekitar dua meter.

Gedung reaktor ini juga dilengkapi dengan sistem ventilasi. Fungsi utama dari gedung reaktor ini adalah untuk menahan radiasi yang berasal dari teras reaktor.

6.1.2 Jenis-jenis Reaktor Daya

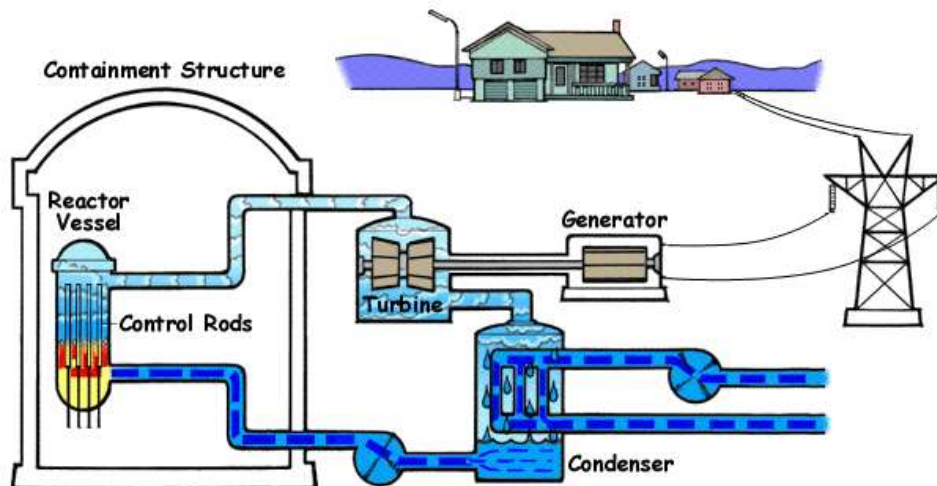
Reaktor Daya yang saat ini beroperasi adalah sebagai berikut.

1. Boiling Water Reactor (BWR), Reaktor Air Didih

Reaktor ini terdiri atas sebuah bejana yang terbuat dari baja. Dalam bejana dipasang pipa-pipa, berisi bahan bakar yang berupa U-235 diperkaya dengan tingkat 3-4 %. Bejana ini diisi dengan air sehingga seluruh bahan bakar terendam air, tetapi pada bagian atas bejana dibiarkan adanya tempat kosong sekitar 12-15 % untuk diisi uap air. Setelah bahan bakar dinyalakan atau setelah terjadi reaksi fisi berantai maka air menjadi panas, mendidih, kemudian terbentuk uap.

Dalam reaktor ini, air dipakai sebagai moderator dan sebagai fluida kerja. Uap yang dihasilkan kemudian dialirkan menuju turbin untuk memutar turbin sehingga dihasilkan tenaga gerak. Tenaga gerak dari turbin selanjutnya dipakai untuk memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Setelah melalui turbin, uap tersebut akan mengalami proses pendinginan sehingga berubah menjadi air. Air tersebut dialirkan kembali ke dalam bejana pada sisi bawah untuk diuapkan kembali.



Gambar 6.1 Boiling Water Reactor

2. Pressurized Water Reactor (PWR), Reaktor Air Bertekanan

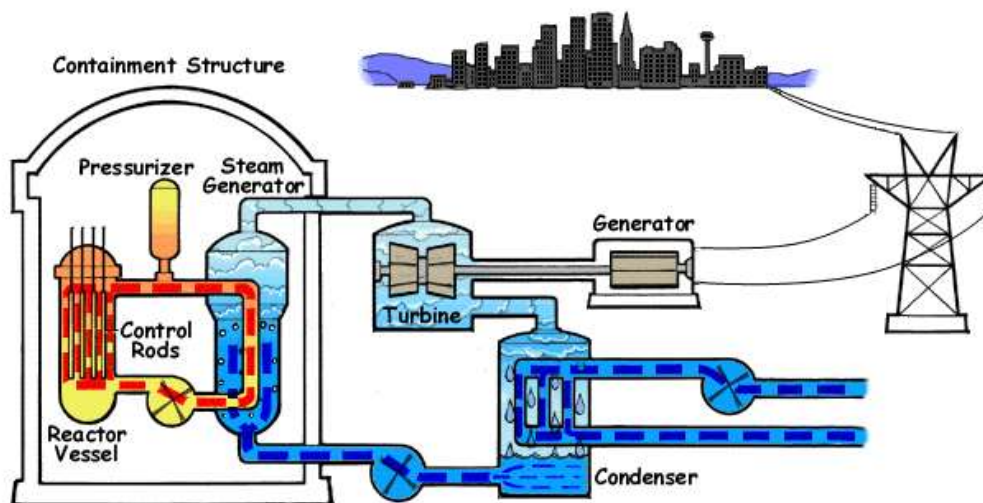
Reaktor ini terdiri atas sebuah bejana baja yang penuh berisi air. Dalam bejana tersebut terletak bahan bakar yang disusun dalam pipa-pipa yang dipasang secara berkelompok. Bahan bakar terdiri atas U-235 yang diperkaya. Suatu PWR mempunyai

perangkat bahan bakar dengan masing-masing terdiri atas 200-300 batang bahan bakar, diatur secara vertikal.

Setelah bahan bakar dinyalakan, terjadi panas sebagai hasil reaksi fisi. Panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi dipakai untuk memanaskan air pendingin primer. Dalam sistem pendingin primer ini dilengkapi juga dengan alat pengontrol tekanan yang dipakai untuk mempertahankan tekanan pada sistem pendingin primer pada tekanan 150 atm. Hal ini digunakan untuk mempertahankan agar air pendingin primer ini tidak mendidih pada temperatur 300 °C.

Air pendingin primer ini selanjutnya dialirkan ke sistem pembangkit uap sehingga terjadi pertukaran panas antara primer dan sistem sekunder. Antara pendingin primer dan pendingin sekunder dipisahkan oleh sistem pipa sehingga tidak terjadi pencampuran antara pendingin primer dengan pendingin sekunder. Pertukaran panas ini menyebabkan air pendingin sekunder mendidih dan menguap pada temperatur 100 oC karena tekanan pada sistem pendingin sekunder dibuat sama dengan tekanan udara normal.

Uap air yang terbentuk dalam sistem pembangkit uap selanjutnya dipakai untuk menggerakkan turbin dan turbin inilah yang menggerakkan generator sehingga menghasilkan tenaga listrik. Listrik yang dihasilkan dari PLTN ini adalah listrik tegangan tinggi. Melalui jaringan tegangan tinggi dan transformator, tegangan tinggi dari listrik tersebut dapat diturunkan lalu listrik tersebut disalurkan ke konsumen.



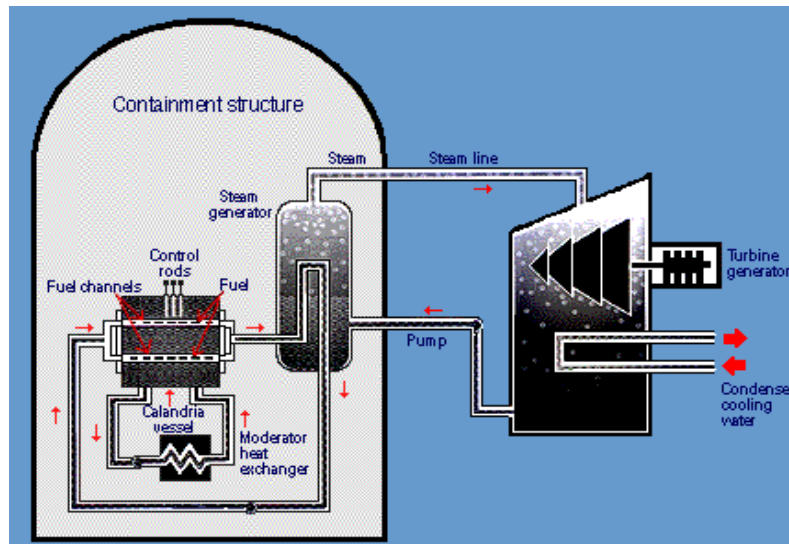
Gambar 6.2. *Pressurized Water Reactor*

3. Heavy Water Reactor (HWR), Reaktor Air Berat

Ada dua jenis reaktor HWR, yaitu reaktor air berat tekan (Pressurized heavy water reactor, PHWR) dan reaktor air berat didih (Boiling Heavy Water Reactor, BHWR). Reaktor

yang paling banyak digunakan adalah PHWR. Jenis PHWR yang dikenal diantaranya reaktor CANDU (*Canadian Deuterium Uranium Reactor*)

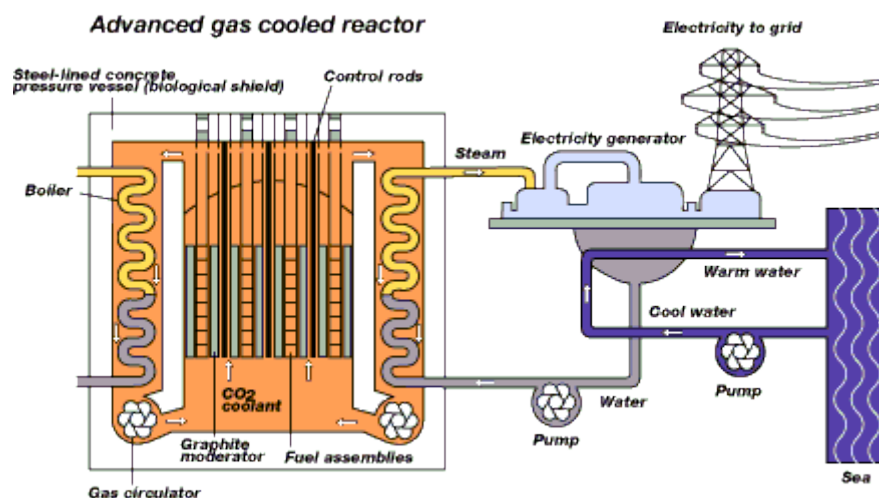
Prinsip kerja reaktor ini hampir sama dengan PWR, namun dalam reaktor ini dipakai air berat (*heavy water*) bukan air biasa. Sedangkan dari segi konstruksi pada PHWR yang mendapat tekanan adalah pipa-pipa, bukan bejana.



Gambar 6.3 Reaktor CANDU

4. Advance Gas Cooled Reactor (AGR), Reaktor Berpendingin Gas

Reaktor ini menggunakan grafit sebagai moderator dan gas karbon sebagai pendingin. Bahan bakarnya adalah pelet oksida uranium, yang diperkaya sampai 2,5 – 3,5 %. Gas karbon disirkulasikan melalui teras, temperaturnya mencapai 650 °C, dan kemudian melalui tabung generator uap air di luar teras, tetapi masih berada di dalam bejana beton dan bejana bertekanan. Batang kendali menembus moderator dan suatu sistem shutdown sekunder dilakukan dengan menyuntikkan nitrogen ke dalam pendingin.



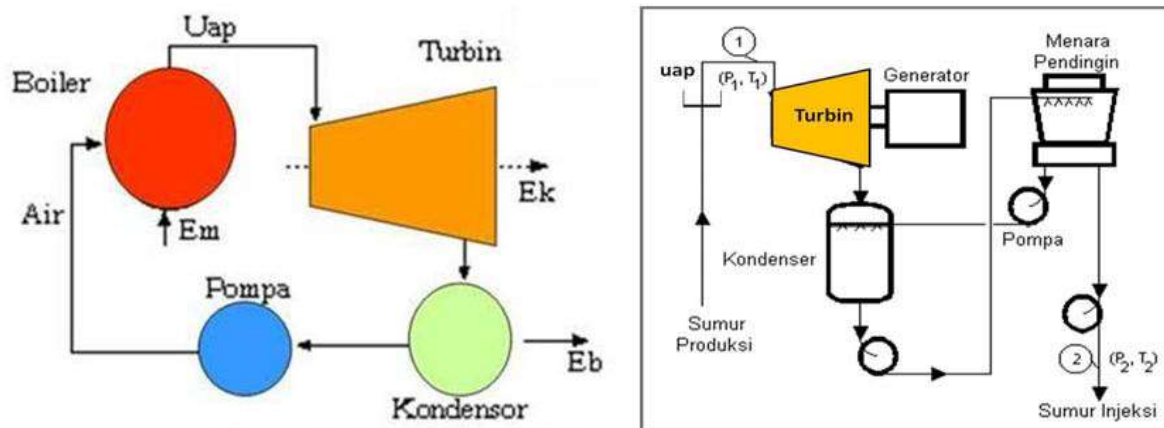
Gambar 6.4 Advanced Gas Cooled Reactor

6.2 Sistem Pembangkit Tenaga Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang berasal dari dalam Bumi. Pusat Bumi cukup panas untuk melelehkan bebatuan. Tergantung pada lokasinya, maka suhu Bumi meningkat satu derajat Celsius setiap penurunan 30 hingga 50 m di bawah permukaan tanah. Suhu Bumi 3000 meter di bawah permukaan cukup panas untuk merebus air. Kadang-kadang, air bawah tanah merayap mendekati bebatuan panas dan menjadi sangat panas atau berubah menjadi uap.

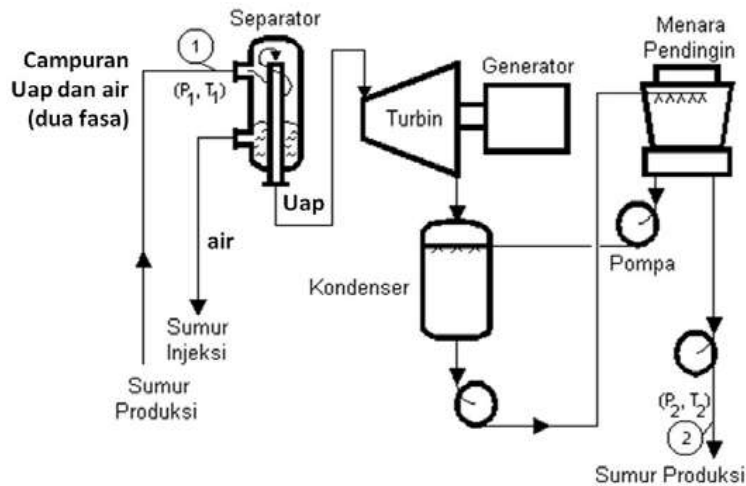
Perut bumi mengandung energi panas yang cukup besar untuk bisa menghasilkan tenaga uap untuk menggerakkan turbin. Dengan memanfaatkan panas dari perut bumi, uap panas dalam perut bumi disalurkan melalui pipa-pipa kemudian di arahkan menuju turbin yang dikopel dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP) pada prinsipnya sama seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), hanya pada PLTU uap dibuat di permukaan menggunakan boiler, sedangkan pada PLTP uap berasal dari reservoir panasbumi. Apabila fluida di kepala sumur berupa fasa uap, maka uap tersebut dapat dialirkan langsung ke turbin, dan kemudian turbin akan mengubah energi panas bumi menjadi energi gerak yang akan memutar generator sehingga dihasilkan energi listrik.



Gambar 6.5 Perbedaan skema kerja PLTU dengan PLTP

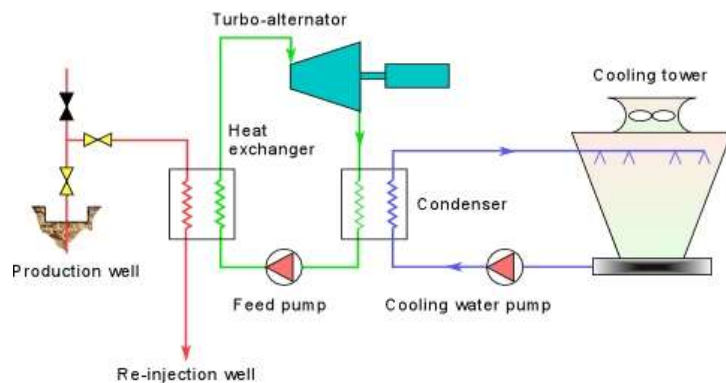
Apabila fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa (fasa uap dan fasa cair) maka terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan pada fluida. Hal ini dimungkinkan dengan melewati fluida ke dalam separator, sehingga fasa uap akan terpisahkan dari fasa cairnya. Fraksi uap yang dihasilkan dari separator inilah yang kemudian dialirkan ke turbin.



Gambar 6.6 Skema kerja siklus binari

Apabila sumberdaya panas bumi mempunyai temperatur sedang, fluida panas bumi masih dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dengan menggunakan pembangkit listrik siklus binari (binary plant). Dalam siklus pembangkit ini, fluida sekunder ((isobutane, isopentane or ammonia) dipanasi oleh fluida panas bumi melalui mesin penukar kalor atau *heat exchanger*. Fluida sekunder menguap pada temperatur lebih rendah dari temperatur titik didih air pada tekanan yang sama. Fluida sekunder mengalir ke turbin dan setelah dimanfaatkan dikondensasikan sebelum dipanaskan kembali oleh fluida panas bumi.

Siklus tertutup dimana fluida panas bumi tidak diambil masanya, tetapi hanya panasnya saja yang diekstraksi oleh fluida kedua, sementara fluida panas bumi diinjeksikan kembali kedalam reservoir.



Gambar 6.7

6.3 ENERGI SURYA

Pemanfaatan energi surya saat ini makin sering diterapkan oleh berbagai industri maupun perumahan. Selain sumber energi yang melimpah dan gratis, pemanfaatan energi surya dengan menggunakan sel fotovoltaik semakin terjangkau sehingga bisa dipasang di

rumah maupun untuk kebutuhan penerangan jalan. Selain sebagai sumber tenaga listrik, energi surya juga dapat dimanfaatkan sebagai tenaga uap, dan sistem pemanas air/udara.

6.3.1 Pemanfaatan Energi Surya

Energi surya saat ini banyak dimanfaatkan dengan berbagai teknologi, diantaranya:

1. Dengan sistem sel surya (fotovoltaik)

Cara kerja sel surya adalah dengan menangkap sinar matahari yang mengenai semikonduktor pada panel sel surya, kemudian tegangan dibangkitkan dengan memisahkan muatan positif dan negatif bebas ke daerah lain dari sel surya. Muatan yang terpisah tersebut dipindahkan ke terminal listrik dalam bentuk aliran tenaga listrik.



Gambar 6.8. Rangkaian panel sel surya

2. Dengan sistem konversi fotoelektrokemis

Sistem konversi fotoelektrokemis energi surya diubah melalui elektrolisis air di mana melalui alat konverter tersebut menghasilkan tenaga listrik dan tenaga kemis yang berupa gas hidrogen sebagai bahan bakar.

3. Dengan sistem penerima termal surya terdistribusi

Cara kerja sistem ini adalah memanfaatkan sinar matahari dengan memanaskan fluida kerja baik berupa air, natrium, maupun gas helium untuk penggerak turbin yang menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Sinar matahari diterima oleh sistem penerima kalor yang merubah fluida kerja menjadi uap untuk selanjutnya menggerakkan turbin.

4. Dengan sistem penerima termal surya secara sentral

Sistem ini mengumpulkan energi matahari dengan menggunakan cermin atau kolektor ke suatu menara yang telah dipasang sistem uap sehingga uap yang dihasilkan mampu untuk menggerakkan turbin.

6.4 Energi Angin

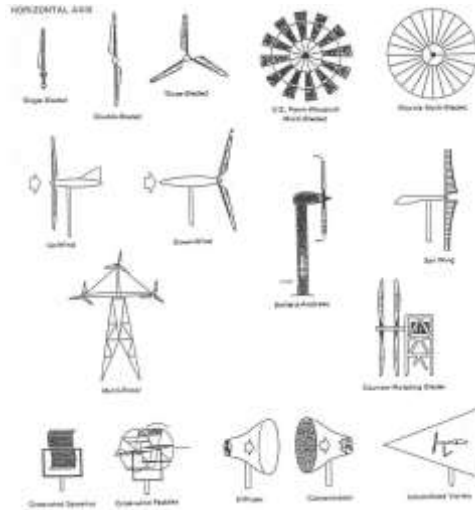
6.4.1 Jenis Turbin

Berdasarkan arah sumbu gerakannya, turbin angin terbagi menjadi 2, yaitu: turbin angin sumbu horizontal dan vertikal. Sedangkan berdasarkan prinsip gaya aerodinamik yang terjadi, turbin angin terbagi menjadi 2, yaitu jenis: lift dan drag. Turbin angin horisumbu horizontal memiliki sumbu putar yang sejajar dengan tanah, sedangkan turbin angin sumbu vertikal memiliki sumbu putar yang arahnya tegak lurus dengan tanah. Setiap jenis turbin angin memiliki perancangan, kekurangan dan kelebihan masing-masing.

A. Turbin Angin Sumbu *Horizontal*

Turbin angin sumbu horizontal mempunyai sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah dan sumbu rotor yang searah dengan arah angin. Komponen utama turbin angin sumbu horizontal meliputi: sudu (*blade*), ekor (*tail*), tiang penyangga (*tower*), dan alternator. Sudu pada turbin angin sumbu horizontal dibuat dengan material yang ringan supaya momen inersianya kecil sehingga mengakibatkan sudu bisa berputar pada kecepatan angin yang rendah.

Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin aksial akan dibedakan menjadi dua macam yaitu: *Upwind* dan *Downwind*. Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin, sedangkan jenis turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah datangnya angin.



Gambar 6.9 Turbin Angin Sumbu Horizontal.

B. Turbin Angin Sumbu Vertical

Turbin angin sumbu vertikal adalah jenis turbin angin yang pertama dibuat manusia. Pada awalnya, putaran rotornya hanya memanfaatkan efek *magnus* yaitu karena adanya selisih gaya *drag* pada kedua sisi rotor atau sudu sehingga menghasilkan momen gaya terhadap sumbu putar rotor. Salah satu contoh turbin angin sumbu vertikal jenis *drag* adalah turbin angin *Savonius*, yang mana terdiri dari dua atau tiga lembar pelat yang dilengkungkan pada arah tangensial yang sama terhadap sumbu putar.

Turbin angin sumbu vertikal modern menerapkan bentuk yang aerodinamis pada rotornya untuk menghasilkan momen gaya. Contohnya adalah turbin angin *Darrieus*. Pada turbin angin *Darrieus*, sudu dibentuk melengkung dan berputar menyapu ruangan seperti tali yang berputar pada sumbu vertikal. Hal ini menyebabkan bentuk geometrinya rumit dan sulit untuk dibuat. Rotor turbin angin *Darrieus* pada umumnya terdiri atas dua atau tiga sudu. Variasi dari turbin angin *Darrieus* adalah yang disebut dengan turbin angin H (tipe H). Tersusun dari dua atau tiga sudu lurus yang dihubungkan dengan struktur rangka ke poros.

Keuntungan dari konsep turbin angin vertikal adalah sederhana dalam perancangannya, diantaranya adalah memungkinkan menempatkan komponen mekanik dan komponen elektronik, transmisi roda gigi dan generator dekat dengan permukaan tanah. Rotor turbin angin sumbu vertikal berputar tanpa dipengaruhi arah angin sehingga tidak membutuhkan mekanisme pengatur arah (seperti ekor) seperti pada turbin angin aksial sumbu horizontal.

Secara umum, potensi energi samudra yang dapat menghasilkan listrik dapat dibagi kedalam 3 jenis potensi energi yaitu energi pasang surut (tidal power), energi gelombang laut (wave energy) dan energi panas laut (ocean thermal energy). Energi pasang surut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan air laut akibat perbedaan pasang surut. Energi gelombang laut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya. Sedangkan energi panas laut memanfaatkan perbedaan temperatur air laut di permukaan dan di kedalaman. Meskipun pemanfaatan energi jenis ini di Indonesia masih memerlukan berbagai penelitian mendalam, tetapi secara sederhana dapat dilihat bahwa probabilitas menemukan dan memanfaatkan potensi energi gelombang laut dan energi panas laut lebih besar dari energi pasang surut.

6.5 MESIN KONVERSI ENERGI GELOMBANG LAUT

Sistem pelampung ini dapat menghasilkan daya hanya dengan mengapungkannya di permukaan lautan yang bergelombang. Sistem ini diletakkan kurang lebih satu atau dua mil laut dari pantai, yang disebut sebagai permanent magnet linear generator buoy. Koil elektrik mengelilingi batang magnet di dalam pelampung dan koil tersebut ditempelkan pada pelampung, batang magnet dikaitkan ke dasar laut. Saat ombak mencapai pelampung, maka pelampung tersebut akan bergerak naik dan turun secara relatif terhadap batang magnet yang menimbulkan beda potensial dan listrik dibangkitkan.

6.6 Mesin Konversi Energi Termal Lautan (Otec)

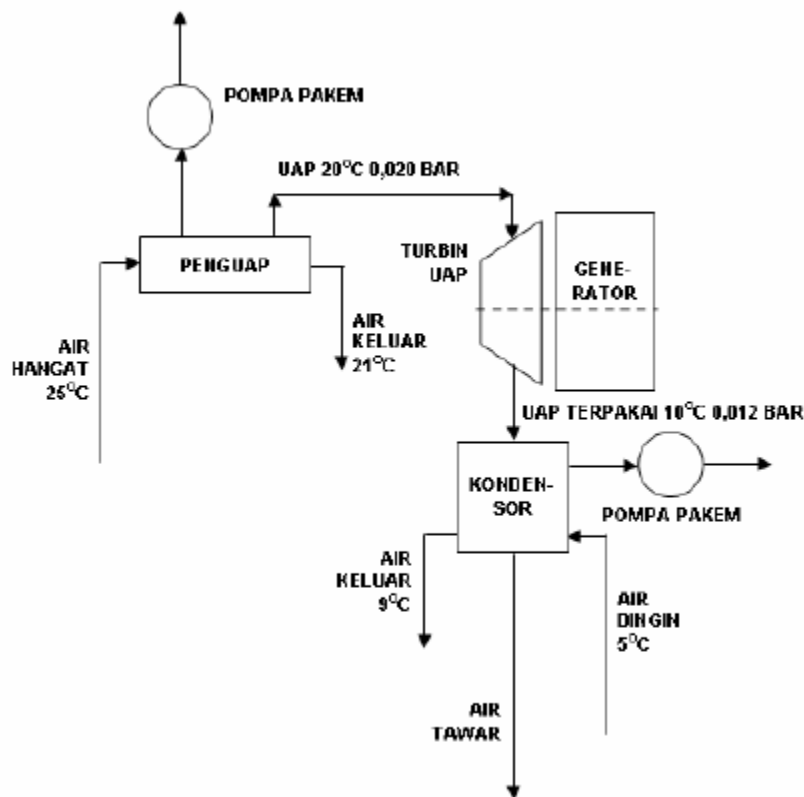
Lautan menerima panas yang berasal dari penyinaran matahari. Selain itu, air lautan juga menerima panas yang berasal dari panas bumi. Pada teknologi konversi energi panas laut atau KEPL (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC), siklus Rankine digunakan untuk menarik arus-arus energi termal yang memiliki sekurang-kurangnya selisih suhu sebesar 20°C. Pada saat ini terdapat dua siklus daya alternatif yang dikembangkan, yaitu siklus Claude terbuka dan siklus tertutup.

Siklus terbuka dengan mendidihkan air laut yang beroperasi pada tekanan rendah, menghasilkan uap air panas yang melewati turbin penggerak/generator. Siklus tertutup menggunakan panas permukaan laut untuk menguapkan fluida penggerak dengan Amonia atau Freon. Uap panas menggerakkan turbin, kemudian turbin berkerja menghidupkan generator untuk menghasilkan listrik. Prosesnya, air laut yang hangat dipompa melewati tempat pengubah dimana fluida pemanas tekanan rendah diuapkan hingga menjalankan turbo-

generator. Air dingin dari dalam laut dipompa melewati pengubah kedua mengubah uap menjadi cair kemudian dialiri kembali dalam sistem.

Dalam siklus Claude terbuka, air laut digunakan sebagai medium kerja maupun sebagai sumber energi. Air hangat yang berasal dari permukaan laut diuapkan dalam suatu alat penguap (flash evaporator) dan menghasilkan uap air dengan tekanan yang sangat rendah, lk 0,02 hingga 0,03 bar dan suhu kira-kira 20°C. Uap itu memutar sebuah turbin uap yang merupakan penggerak mula bagi generator yang menghasilkan energi listrik (Gambar 1).

Karena tekanan uap itu rendah sekali maka ukuran-ukuran turbin menjadi sangat besar. Setelah melewati turbin, uap yang sudah dimanfaatkan dialirkan ke sebuah kondensor yang menghasilkan air tawar. Kondensor didinginkan oleh air laut yang berasal dari lapisan bawah permukaan laut. Dengan demikian, metode dengan siklus Claude ini menghasilkan energi listrik maupun air tawar. Masalah dengan metode ini adalah bahwa ukuran-ukuran turbin menjadi sangat besar oleh karena tekanan uap yang begitu rendah. Sebagai contoh, sebuah modul sebesar 10 MW yang terdiri atas penguap, turbin dan kondensor, akan memerlukan ukuran garis tengah dan panjang 100 meter.



Gambar 6.10 Skema Prinsip Kerja OTEC

6.7 Energi Pasang Surut

Dua kali sehari, air pasang naik dan turun menggerakkan volume air yang sangat banyak saat tingkat air laut naik dan turun di sepanjang garis pantai. Energi air pasang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik seperti halnya listrik tenaga air tetapi dalam skala yang lebih besar. Pada saat air pasang, air bisa ditahan di belakang bendungan. Ketika surut, maka tercipta perbedaan ketinggian air antara air pasang yang ditahan di bendungan dan air laut, dan air laut di belakang bendungan bisa mengalir melalui turbin yang berputar, untuk menghasilkan listrik.

6.7 FUEL CELL

Contoh implementasi energi kimia menjadi listrik secara langsung, adalah baterai dan fuel cell (sel bahan bakar). Mengingat pada sistem ini perubahan energi tidak melewati fase energi panas, maka tidak dibatasi oleh siklus mesin kalor dapat-balik (reversible) eksternal, yaitu:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H}.$$

Baterai dan fuel cell prinsip operasinya sama, perbedaannya terdapat pada bahan bakarnya, dengan baterai mempunyai jumlah bahan bakar atau energi tetap sedangkan fuel cell mempunyai bahan bakar yang terus-menerus diisikan. Beberapa baterai dapat beroperasi dapat-balik dengan produk reaksi kimia dipisahkan kembali ke reaktan semula dengan mengisikan daya listrik dalam baterai pada waktu pengisian (charging). Baterai digunakan sebagai sistem penyimpan energi dan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu baterai primer dan sekunder. Baterai primer (seperti sel konvensional "C" dan "D") tidak dapat diisi kembali, sedangkan baterai sekunder (seperti baterai mobil dengan asam dan timah) dapat diisi kembali berkali-kali.

Baterai dan fuel cell komposisinya sama, keduanya terdiri dari dua elektrode yang dipisahkan oleh larutan elektrolit atau matriks. Dalam fuel cell, reaktan bahan bakar, pada umumnya hidrogen (H₂) atau karbon monoksida (CO) diberikan ke salah satu elektrode berpori dan oksigen (O₂) atau udara dimasukkan ke dalam elektrode berpori yang lain. Elektrode suatu fuel cell harus memenuhi tiga hal, yaitu:

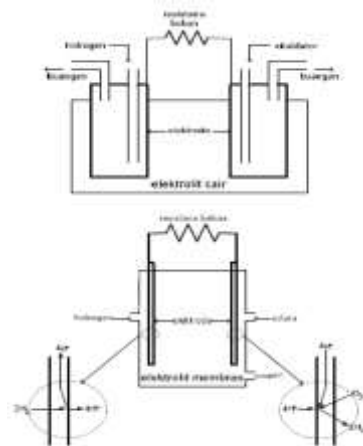
(1) Berpori, agar bahan bakar dan elektrolit dapat menembusnya untuk memperoleh kontak yang cukup. Ukuran pori elektrode sangat penting. Ukuran terlalu besar akan mengakibatkan gas bahan bakar "menggelembung" dan hilang keluar, sedangkan ukuran terlalu kecil akan

terjadi kontak yang tidak cukup antara reaktan dan elektrolit mengakibatkan kapasitas sel berkurang.

(2) Mengandung katalisator kimia untuk memecah ikatan bahan bakar menjadi atom, agar menjadi lebih reaktif. Katalisator paling populer yang digunakan saat ini adalah platina dan nikel yang disinter.

(3) Dapat melewati elektron ke terminal.

Diagram skematis fuel cell, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.11. berikut



Gambar 6.11 Skema Fuel Cell

DAFTAR PUSTAKA

Cengel,A Yunus, Boles, A Michael. *Thermodynamics An Engineering Approach*. McGraw Hill International Editions,:New York, 1994

El-Wakil, M.M., *Power Plant Technology*. McGraw Hill International Editions, Singapore, 1984

Hasan. *Energi Nuklir 'Solusi Energi di Indonesia'*. Satu Nusa; Bandung, 2014

Pulkrabek, Willard W. 2004. *Engineering Fundamental of the Internal Combustion Engine*. Pientice Hall, New York.

Pudjanarasa, Astu. Nursuhud, Djati. *Mesin Konversi Energi*. Andi, Yogyakarta,2008