

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Termodinamika

Termodinamika sangat penting untuk menganalisa sembarang sistem yang melibatkan perpindahan energi. Berbagai pemakaian termodinamika yang praktis dan lazim dalam rekayasa adalah untuk menganalisa berbagai sistem yang mengandung suatu zat kerja, biasanya dalam fase cair atau gas, yang mengalir di dalam peralatan. Berbagai sistem yang menjadi pusat perhatian disini adalah sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi. Dalam berbagai sistem yang membangkitkan daya, perhatian difokuskan pada pengkonversian energi dalam dari molekul-molekul bahan bakar hidrokarbon menjadi energi listrik atau mekanis (Reynolds dan Perkins, 1977).

2.1.1 Hukum Pertama Termodinamika

Hukum termodinamika pertama dikenal dengan prinsip konservasi energi yang menyatakan bahwa energi itu lestari. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, disebut juga Hukum Kekekalan Energi. Walaupun energi terdapat dalam berbagai bentuk, jumlah energi total adalah konstan, dan bila energi hilang dalam satu bentuk, energi ini timbul dalam bentuk lain secara bersama-sama. Dalam bentuk dasar, hukum pertama mensyaratkan:

$$(\text{Energi sistem}) + (\text{Energi sekeliling}) = 0 \quad (1)$$

(Pudjanarso dan Nursuhud, 2006).

Energi total dari suatu sistem disebut sebagai energi dalam (U). Nilai mutlak energi dalam sistem manapun tidak mungkin diketahui, tetapi dalam termodinamika kita banyak berhadapan dengan perubahan pada energi dalam. Energi dalam adalah sifat keadaan. Artinya nilai energi dalam bergantung hanya pada keadaan akhir sistem dan tidak bergantung pada cara pencapaian keadaan itu.

Eksperimen membuktikan dua sifat lebih lanjut dari energi dalam, yaitu:

1. Energi dalam sistem yang terisolasi adalah tetap. Pengamatan ini sering diringkaskan dengan ucapan bahwa energi bersifat kekal. Bukti kekekalan energi adalah kemustahilan untuk membuat mesin yang bergerak terus menerus, yang bekerja tanpa bahan bakar; mustahil untuk menciptakan atau menghancurkan energi.
2. Sifat kedua dari energi dalam adalah perpindahan energi (karena kita dapat melihat apakah beban dinaikkan atau diturunkan dalam lingkungannya, atau apakah es sudah meleleh). Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem. Energi adalah energi, bagaimanapun cara memperolehnya atau menghabiskannya.

Kedua sifat energi ini diringkaskan dalam sebuah pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika diubah dengan melakukan kerja atau dengan pemanasan (Atkins, 1999). Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur. Secara matematis dapat dilihat pada Persamaan (2) (Daryus, 2007):

$$Q = \Delta U + W \quad (2)$$

Dimana

Q = kalor yang dipindahkan

U = perubahan energi dalam

W = kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

2.1.2 Hukum Kedua Termodinamika

Hukum kedua termodinamika dinyatakan dengan entropi. Pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan.

$$\Delta S_{\text{tot}} \geq 0 \quad (3)$$

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuaian bebas dari gas) adalah proses spontan, sehingga proses itu disertai dengan kenaikan entropi. Proses irreversibel menghasilkan entropi, sedangkan proses reversibel adalah perubahan yang sangat seimbang, dengan sistem dalam keseimbangan dengan lingkungannya pada setiap tahap. Setiap langkah yang sangat kecil di sepanjang jalannya bersifat reversibel, dan terjadi tanpa menyebarkan energi secara kacau, sehingga juga tanpa menaikkan entropi. Proses reversibel tidak menghasilkan entropi, melainkan hanya memindahkan entropi dari suatu bagian sistem terisolasi ke bagian lainnya (Atkins, 1999).

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya.

Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada setiap siklus tanpa memperhatikan dari benda mana siklus itu mendapatkan energi melalui perpindahan kalor. Ketidaksamaan Clausius mendasari dua hal yang digunakan untuk menganalisis sistem tertutup dan volume tetap berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4)$$

dimana dQ mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus, T adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Sedangkan dS dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai entropi.

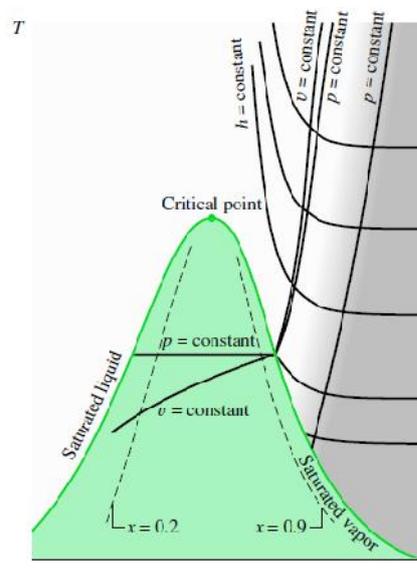
Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram entropi sangat membantu untuk menentukan lokasi dan menggambarkan proses pada diagram dimana koordinatnya adalah nilai entropi. Diagram dengan salah satu sumbu koordinat berupa entropi yang sering digunakan adalah diagram temperatur-

entropi (T-s) dan diagram entalpi-entropi (h-s). Adapun penjelasan mengenai kedua diagram tersebut terdapat di bawah ini.

a. Diagram T-s

Bentuk umum dari diagram entropi dapat dilihat pada Gambar 1. Pada daerah uap panas lanjut, garis-garis volume spesifik konstan, kemiringannya lebih curam dari garis-garis tekanan konstan. Garis-garis kualitas tetap ditunjukkan dalam daerah dua fase cair-uap. Pada beberapa gambar, garis kualitas uap tetap ditandai sebagai garis-garis persen uap yang merupakan rasio massa cairan dengan massa total.

Pada daerah uap panas lanjut dalam diagram T-s, garis-garis entalpi spesifik konstan hampir membentuk garis lurus pada saat tekanan berkurang. Keadaan ini ditunjukkan pada daerah terarsir pada Gambar 1. Untuk keadaan pada daerah ini, entropi ditentukan hanya dengan temperatur. Variasi tekanan antara beberapa keadaan tidak berpengaruh besar.



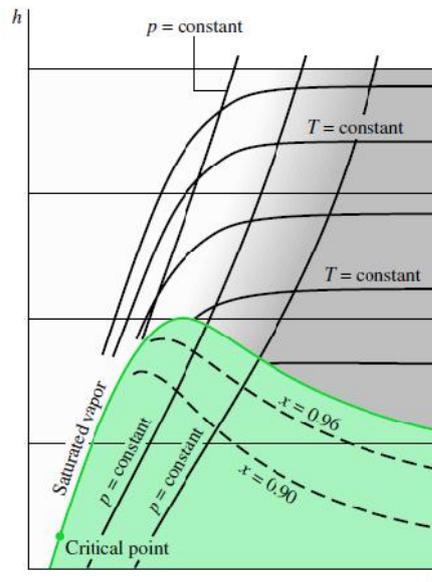
Gambar 1. Diagram Temperatur-Entropi

(Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006)

b. Diagram h-s

Diagram entalpi-entropi ini disebut juga dengan diagram Mollier, seperti tampak pada Gambar 2. Garis-garis kualitas konstan ditunjukkan pada daerah

campuran dua fase cair-uap. Grafik ini digunakan untuk mendapatkan nilai sifat pada keadaan uap panas lanjut dan untuk campuran dua fase cair-uap. Data cairan umumnya jarang tersedia. Pada daerah uap panas lanjut, garis temperatur konstan mendekati horizontal pada saat tekanan berkurang yang ditunjukkan pada daerah terarsir pada Gambar 2 (Moran dan Shapiro, 2006).



Gambar 2. Diagram Entalpi-Entropi

(Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006)

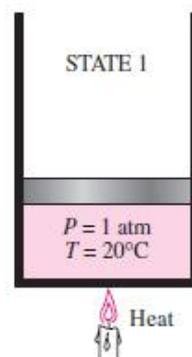
2.2 Perubahan Fase pada Zat Murni

Air dapat berada pada keadaan campuran antara cair dan uap, contohnya yaitu pada boiler dan kondenser dari suatu sistem pembangkit listrik tenaga uap. Dibawah ini akan dijelaskan secara lebih rinci mengenai perubahan fase pada zat murni, contohnya air.

2.2.1 Cair Tekan (*Compressed Liquid*)

Untuk memudahkan dalam menjelaskan proses ini maka lihat pada Gambar 3 dimana sebuah alat berupa torak dan silinder yang berisi air pada 20°C dan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini, air berada pada fase cair tekan karena temperatur dari air tersebut masih dibawah temperatur saturasi air pada saat tekanan 1 atm. Kemudian kalor mulai ditambahkan kedalam air sehingga terjadi kenaikan

temperatur. Seiring dengan kenaikan temperatur tersebut maka air secara perlahan berekspansi dan volume spesifiknya meningkat. Karena ekspansi ini maka piston juga secara perlahan mulai bergerak naik. Tekanan didalam silinder konstan selama proses karena didasarkan pada tekanan atmosfer dari luar dan berat dari torak (Cengel dan Boles, 1994).

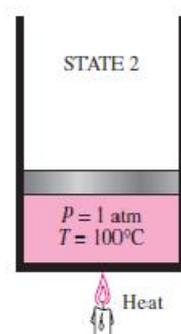


Gambar 3. Air pada Fase Cair Tekan (*Compressed Liquid*)

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.2.2 Cair Jenuh (*Saturation Liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100°C. Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian dari air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh (*saturation liquid*) seperti digambarkan pada Gambar 4 (Cengel dan Boles, 1994).

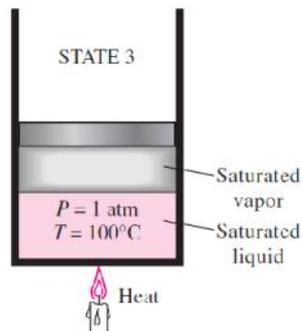


Gambar 4. Air pada Fase Cair Jenuh (*Saturated Liquid*)

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.2.3 Campuran Air-Uap (*Liquid-Vapor Mixture*)

Saat pendidihan berlangsung, tidak terjadi kenaikan temperatur sampai cairan seluruhnya berubah menjadi uap. Temperatur akan tetap konstan selama proses perubahan fase jika temperatur juga dijaga konstan. Pada proses ini volume fluida didalam silinder meningkat karena perubahan fase yang terjadi, volume spesifik uap lebih besar daripada cairan. Sehingga menyebabkan torak terdorong keatas. Kondisi ini dapat digambarkan pada Gambar 5 (Cengel dan Boles, 1994).

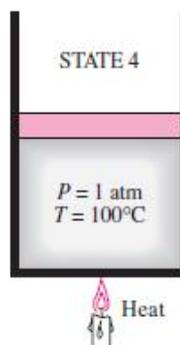


Gambar 5. Campuran Air dan Uap

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.2.4 Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)

Jika kalor terus ditambahkan, maka proses penguapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi (Cengel dan Boles, 1994).

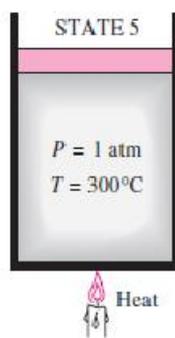


Gambar 6. Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.2.5 Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

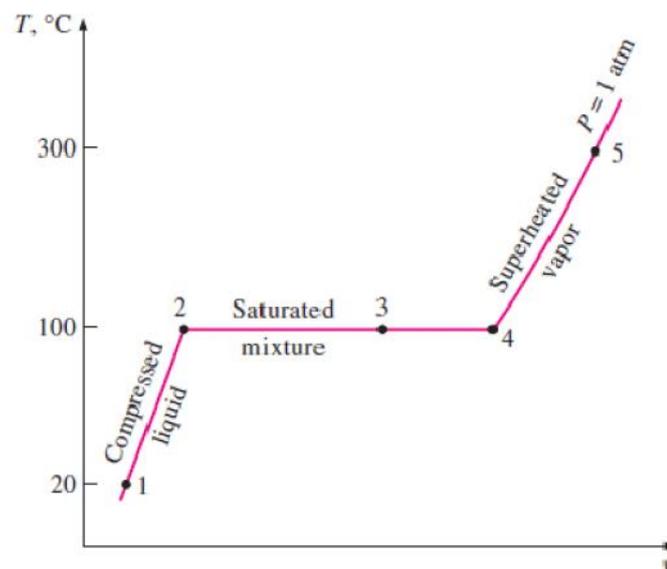
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap pada tekanan 1 atm yaitu 100°C (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 7. Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Proses diatas digambarkan pada suatu diagram T-v seperti terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Diagram T-v Pemanasan Air pada Tekanan Konstan

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.3 Tabel Properti

Properti dari suatu zat biasanya ditampilkan dalam bentuk tabel. Properti termodinamika dapat diukur dengan mudah, tetapi ada yang tidak bisa langsung melainkan harus dihitung terlebih dahulu. Untuk masing-masing zat, properti termodinamika ditampilkan lebih dari satu tabel. Pemisahan tabel tersebut dipersiapkan untuk masing-masing daerah seperti *superheated vapor*, *compressed liquid* serta *saturated*.

2.3.1 Entalpi

Jika kita melihat tabel maka kita akan menemukan dua buah properti baru diantaranya yaitu entalpi (h) dan entropi (s). Entalpi merupakan properti baru yang digunakan untuk menyatakan kombinasi antara $u + Pv$ yang dinyatakan dalam persamaan (Cengel dan Boles, 1994):

$$h = u + Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5)$$

atau

$$H = U + PV \quad (\text{kJ}) \quad (6)$$

2.3.2 Keadaan Cair Jenuh dan Uap Jenuh

Properti dari cair jenuh dan uap jenuh pada air dapat dilihat pada tabel lampiran 1 dan lampiran 2. Kedua tabel tersebut memberikan informasi yang sama, perbedaannya pada tabel lampiran 1 diurutkan berdasarkan temperatur sedangkan pada tabel lampiran 2 diurutkan berdasarkan tekanan. Penggunaan tabel lampiran 1 ditunjukkan pada Gambar 9. *Subscript f* digunakan untuk properti pada cair jenuh dan *subscript g* digunakan untuk properti pada uap jenuh. Sedangkan *subscript fg* digunakan untuk menyatakan selisih antara cair jenuh dan uap jenuh.

v_f = volume spesifik pada cair jenuh

v_g = volume spesifik pada uap jenuh

v_{fg} = selisih antara v_g dan v_f ($v_{fg} = v_g - v_f$)

Temp. °C T	Sat. press. kPa P_{sat}	Specific volume m^3/kg	
		Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g
85	57.868	0.001032	2.8261
90	70.183	0.001036	2.3593
95	84.609	0.001040	1.9808

Gambar 9. Contoh Tabel *Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor)*

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

2.3.3 Keadaan Campuran Air dan Uap

Selama proses penguapan, air terdiri dari dua bagian yaitu cair dan uap yang disebut dengan campuran. Untuk menganalisa campuran ini maka kita harus mengetahui perbandingan antara massa air dan massa uap yang disebut dengan kualitas (x) yang dinyatakan dalam persamaan:

$$x = \frac{m_{uap}}{m} \quad (7)$$

dimana

$$m = m_{cair} + m_{uap} = m_f + m_g \quad (8)$$

Kualitas memiliki nilai dari nol sampai dengan satu, pada keadaan cair jenuh $x = 0$ dan pada keadaan uap jenuh $x = 1$. Meskipun didefinisikan sebagai nilai perbandingan, kualitas sering kali diberikan dalam bentuk persentase.

Untuk menghitung nilai x dapat juga dilakukan dengan menggunakan perbandingan dari volume dari campuran. Volume total campuran adalah jumlah volume fase cair dan uap.

$$V = V_{cair} + V_{uap} \quad (9)$$

Jika dibagi dengan massa total campuran m maka diperoleh volume spesifik rata-rata (v_{avg}).

$$v_{avg} = \frac{V}{m} = \frac{V_{cair}}{m} + \frac{V_{uap}}{m} \quad (10)$$

Karena fase cair adalah cair jenuh dan fase uap adalah uap jenuh, $V_{\text{cair}} = m_{\text{cair}} \cdot v_f$ dan $V_{\text{uap}} = m_{\text{uap}} \cdot v_g$, jadi

$$v_{\text{avg}} = \left(\frac{m_{\text{cair}}}{m}\right) v_f + \left(\frac{m_{\text{uap}}}{m}\right) v_g \quad (11)$$

Kualitas didefinisikan sebagai, $x = m_{\text{uap}}/m$, dan $m_{\text{cair}}/m = 1-x$, sehingga apabila disubstitusikan ke persamaan diatas, akan diperoleh

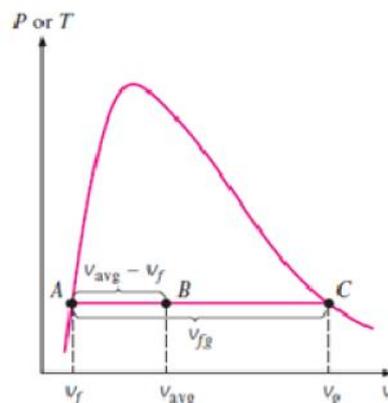
$$v_{\text{avg}} = (1 - x) v_f + x v_g \quad (12)$$

$$v_{\text{avg}} = v_f + x(v_g - v_f) = v_f + x \cdot v_{fg} \quad (13)$$

dan didapatkan persamaan untuk kualitas uap,

$$x = \frac{v_{\text{avg}} - v_f}{v_{fg}} \quad (14)$$

Berdasarkan persamaan ini, kualitas dapat dihubungkan dengan suatu garis horizontal pada diagram P-v atau T-v seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kualitas Uap Air

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Analisa yang telah diberikan diatas dapat digunakan untuk energi dalam (u) dan entalpi (h) yang akan menghasilkan persamaan dibawah ini

$$u_{\text{avg}} = u_f + x \cdot u_{fg} \quad (15)$$

$$h_{\text{avg}} = h_f + x \cdot h_{fg} \quad (16)$$

semua hasil persamaan dapat dirangkum dalam suatu persamaan umum, yaitu

$$y_{\text{avg}} = y_f + x \cdot y_{fg} \quad (17)$$

dimana y adalah v , u , h , atau s (Cengel dan Boles, 1994).

2.3.4 Keadaan Uap Panas Lanjut

Daerah ini terletak pada bagian kanan dari garis uap jenuh dan pada bagian atas temperatur titik kritis. Dengan membandingkan dengan uap jenuh maka uap panas lanjut memiliki beberapa karakteristik, diantaranya (Cengel dan Boles, 1994):

1. Tekanan lebih rendah ($P < P_{\text{sat}}$ pada T yang sama)
2. Temperatur lebih tinggi ($T > T_{\text{sat}}$ pada P yang sama)
3. Volume spesifik lebih tinggi ($v > v_g$ pada P atau T yang sama)
4. Energi dalam lebih tinggi ($u > u_g$ pada P atau T yang sama)
5. Entalpi lebih tinggi ($h > h_g$ pada P atau T yang sama).

2.3.5 Keadaan Cair Tekan

Tabel cair tekan formatnya sama dengan tabel uap panas lanjut. Hanya saja pada umumnya tabel cair tekan memiliki variasi tekanan yang besar. Dengan membandingkan dengan uap jenuh maka cair tekan memiliki beberapa karakteristik, diantaranya (Cengel dan Boles, 1994):

1. Tekanan lebih tinggi ($P > P_{\text{sat}}$ pada T yang sama)
2. Temperatur lebih rendah ($T < T_{\text{sat}}$ pada P yang sama)
3. Volume spesifik lebih rendah ($v < v_g$ pada P atau T yang sama)
4. Energi dalam lebih rendah ($u < u_g$ pada P atau T yang sama)
5. Entalpi lebih rendah ($h < h_g$ pada P atau T yang sama).

2.4 Teknik Pembakaran

2.4.1 Prinsip Pembakaran

Pengertian pembakaran secara umum yaitu terjadinya oksidasi cepat dari bahan bakar disertai dengan produksi panas dan cahaya. Segala jenis pembakaran memerlukan tiga elemen agar pembakaran tersebut dapat berlangsung. Elemen-elemen tersebut adalah bahan bakar (*fuel*), oksidan (*oxidizer*), dan sumber panas (*source of heat*). Jika tiga jenis elemen ini dikombinasikan di dalam lingkungan yang layak, maka akan terjadi pembakaran. Jika salah satu dari tiga elemen ini dihilangkan, tidak akan terjadi pembakaran (UNEP, 2006).

Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi jika ada pasokan oksigen yang cukup. Oksigen (O_2) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20,9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah ke bentuk gas sebelum dibakar. Biasanya diperlukan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Hampir 79% udara (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran. Nitrogen mengurangi efisiensi pembakaran dengan cara menyerap panas dari pembakaran bahan bakar dan mengencerkan gas buang. Nitrogen juga mengurangi transfer panas pada permukaan alat penukar panas, juga meningkatkan hasil samping pembakaran, yang juga harus dialirkan melalui alat penukar panas sampai ke cerobong (UNEP, 2006).

Jumlah O_2 tertentu dibutuhkan untuk pembakaran yang sempurna dengan tambahan sejumlah udara (udara berlebih) diperlukan untuk menjamin pembakaran yang sempurna. Namun, terlalu banyak udara berlebih akan mengakibatkan kehilangan panas dan efisiensi. Tidak semua bahan bakar diubah menjadi panas dan diserap oleh peralatan pembangkit. Biasanya semua hidrogen dalam bahan bakar terbakar. Saat ini, hampir seluruh bahan bakar untuk *boiler*, karena dibatasi standar polusi, mengandung sedikit atau tanpa sulfur. Sehingga tantangan utama dalam efisiensi pembakaran mengarah ke karbon yang tidak terbakar (dalam abu atau gas tidak terbakar sempurna), yang masih menghasilkan CO selain CO_2 .

Tujuan dari pembakaran yang sempurna adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “Tiga T” pembakaran yaitu (UNEP, 2006):

a. T – *Temperature* (Temperatur/suhu)

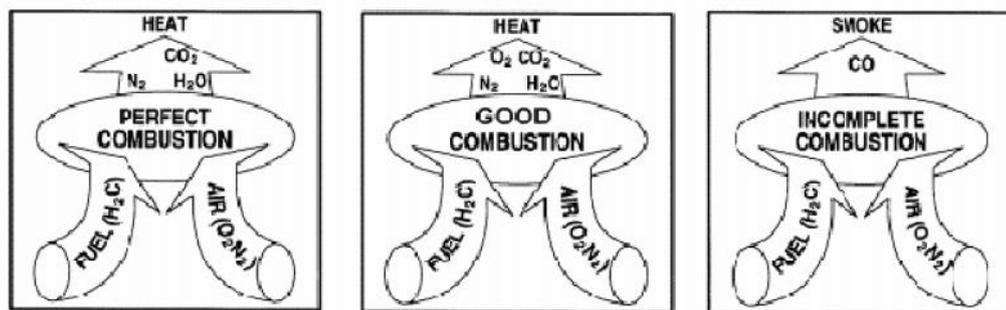
Temperatur yang digunakan dalam pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia

b. T – *Turbulence* (Turbulensi)

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi

c. T - *Time* (Waktu)

Waktu yang cukup agar *input* panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia



Gambar 11. Pembakaran yang Sempurna, yang Baik, dan Tidak Sempurna

(Biro Efisiensi Energi, 2004)

Gambar 11 merupakan ilustrasi dari pembakaran yang sempurna, yang baik, dan tidak sempurna. Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan jumlah panas yang maksimum. Pembakaran dinyatakan secara kualitatif atau kuantitatif dengan reaksi kimia. Jumlah panas yang dihasilkan bahan bakar dinyatakan sebagai nilai kalori pembakaran (*calorific value*). Reaksi kimia terjadi melalui suatu proses oksidasi senyawa-senyawa karbon, hidrogen dan sulfur yang ada dalam bahan bakar. Reaksi ini umumnya menghasilkan nyala api. Terdapat dua istilah pembakaran yang berhubungan dengan udara *excess*, yaitu:

a. *Neutral combustion*

Merupakan pembakaran tanpa *excess* atau defisit udara dan tanpa bahan bakar yang tidak terbakar

b. *Oxidizing combustion*

Merupakan pembakaran dengan *excess* udara. Udara yang berlebih bukan merupakan jaminan pembakaran yang sempurna.

2.4.2 Kebutuhan Udara Teoritis

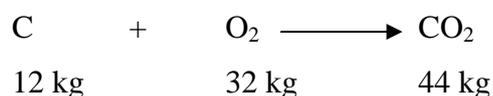
Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara:

- a. berdasarkan pada satuan berat
- b. berdasarkan pada satuan volume.

Pada suatu analisis pembakaran selalu diperlukan data-data berat molekul dan berat atom dari unsur-unsur yang terkandung dalam bahan bakar.

a. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat

Analisis ini digunakan untuk menghitung kebutuhan teoritis pada pembakaran sempurna sejumlah bahan bakar tertentu. Sebagai contoh:



Ini berarti bahwa setiap kg karbon memerlukan 32 kg oksigen secara teoritis untuk membakar sempurna karbon menjadi karbondioksida. Apabila oksigen yang dibutuhkan untuk membakar masing-masing unsur pokok dalam bahan bakar dihitung lalu dijumlahkan, maka akan ditemukan kebutuhan oksigen teoritis yang dibutuhkan untuk membakar sempurna seluruh bahan bakar. Oleh karena itu untuk memperoleh harga kebutuhan oksigen teoritis yang sebenarnya maka dibutuhkan oksigen yang telah dihitung berdasarkan persamaan reaksi pembakaran kemudian dikurangi dengan oksigen yang terkandung dalam bahan bakar.

b. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

Apabila dalam suatu analisis bahan bakar dinyatakan dalam persentase berdasar volume, maka suatu perhitungan yang serupa dengan perhitungan berdasarkan berat bisa digunakan untuk menentukan volume dari udara teoritis yang dibutuhkan. Untuk menentukan udara teoritis harus memahami Hukum Avogadro yaitu “gas-gas dengan volume yang sama pada suhu dan tekanan standar (0°C dan tekanan sebesar 1 Bar) berisikan molekul dalam jumlah yang sama” (Diklat PLN, 2006). Hal yang penting untuk diingat dalam hukum gas ideal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Gas Ideal

Temperatur	Tekanan
0°C	1 atm
273,16 K	760 mmHg
32°F	2992 inHg
491,69°R	14,70 psi

Sumber: Hougen A. Olaf (1961)

2.4.3 Konsep Udara Berlebih (*Excess Air*)

Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O₂ yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari:

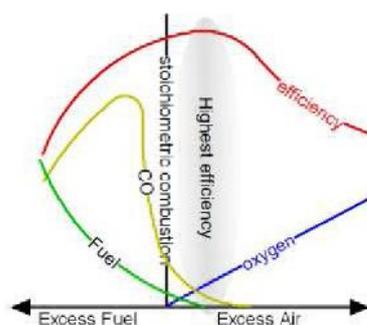
- Komposisi gas buang yang meliputi N₂, CO₂, O₂ dan CO
- Pengukuran secara langsung udara yang disuplai.

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{udara suplai} - \text{udara teoritis}}{\text{udara teoritis}} \times 100\% \quad (18)$$

Sumber: Himmelblau (1991)

Efisiensi pembakaran akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah *excess air* hingga pada nilai tertentu, yaitu saat nilai kalor yang terbuang pada gas buang lebih besar daripada kalor yang dapat disuplai oleh pembakaran yang optimal. Ilustrasi mengenai efisiensi pembakaran terhadap nilai *excess air* dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran dengan Udara Berlebih

Sumber: Totok Gunawan (2010)

Parameter yang diperlukan untuk kualifikasi bahan bakar dan udara didalam sebuah proses pembakaran adalah rasio udara atau bahan bakar, yaitu jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar = mol udara/mol bahan bakar atau massa udara (kg)/massa bahan bakar (kg).

2.5 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja prototipe pembangkit uap yang dirancang adalah solar dan LPG. Berikut adalah pembahasan mengenai kedua jenis bahan bakar tersebut.

2.5.1 Solar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar minyak nabati hasil destilasi dari minyak bumi mentah. Bahan bakar ini berwarna kuning coklat yang jernih. Penggunaan solar pada umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm), yang juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pada pembakaran langsung dalam dapur-dapur kecil yang terutama diinginkan pembakaran yang bersih. Minyak solar ini biasa juga disebut *Gas Oil, Automotive Diesel Oil, High Speed Diesel* (Pertamina, 2005). Bahan bakar solar mempunyai sifat-sifat utama, yaitu:

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- g. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.

2.5.2 LPG

LPG (*liquified petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam atau kilang *crude oil*. Dengan menambah

tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}). Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara (PT. Aptogas Indonesia, 2015)

Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan berbentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan.

Adapun spesifikasi solar dan LPG dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Spesifikasi Solar

No	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji ASTM
			Min.	Maks.	
1	Bilangan Cetana :				
	- Angka Cetana atau	-	51	-	D 613 – 95
	- Indeks Cetana	-	48	-	D 4737 - 96a
2	Berat Jenis (pada suhu 15 ⁰ C)	Kg/m ³	820	860	D 445 – 97
3	Viskositas (pada suhu 15 ⁰ C)	mm ² /s	2	4,5	D 445 – 97
4	Kandungan Sulfur	% mm	-	0,05	D 2622 – 98
5	Distilasi				
	T 90	⁰ C	-	340	
	T 95	⁰ C	-	360	
	Titik Didih Akhir	⁰ C	-	370	
6	Titik Nyala	⁰ C	55	-	D 93 – 799c
7	Titik Tuang	⁰ C	-	18	D 97
8	Residu Karbon	% mm	-	0,30	D 4530 – 93
9	Kandungan Air	mg/kg	-	500	D 1744 – 92
10	Stabilitias Osidasi	g/m ³	-	25	D 2274 – 94
11	Kandungan Fame	% v/v	-	10	
12	Warna	No ASTM	-	1	D 1500
13	Penampilan Visual	-	Jernih dan terang		

Sumber : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi (2006)

Tabel 3. Spesifikasi LPG

Description	Min	Max
Specific Gravity at 60/60 °F	To be reported	
Vapour pressure 100°F psig	-	120
Weathering test at 36°F % Vol	95	-
Copper Corrosion 1 hrs 100 ° F	-	ASTM No.1
Total Sulphur, grains/100 cuft	-	
Water content	Free of water	Free of water
Komposisi :		D-2163 Test
C2 % vol	-	0.2
C5 + (C5 and heavier) % vol	97.5	-
thyl or Buthyl mercaptan added ml/100 AG		50

Sumber: Pertamina (2005)

2.6 Proses Perpindahan Panas

Kalor adalah suatu energi yang mudah diterima dan mudah sekali dilepaskan sehingga dapat mengubah temperatur zat tersebut menjadi naik atau turun dan memiliki satuan °C atau Kelvin. Kalor juga bisa berpindah dari satu zat ke zat yang lain melalui medium atau perantara (Okta, 2010).

Perpindahan panas adalah suatu proses perpindahan energi panas pada suatu zat atau ke zat yang lain. Proses perpindahan panas dari sumber panas ke penerima dibedakan atas tiga cara yaitu (McCabe, 1993):

1. Perpindahan panas secara konduksi
2. Perpindahan panas secara konveksi
3. Perpindahan panas secara radiasi

2.6.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana molekul-molekul dari zat perantara tidak ikut berpindah tempat tetapi molekul-molekul tersebut hanya menghantarkan panas atau proses perpindahan panas dari suhu yang tinggi ke bagian lain yang suhunya lebih rendah. Konduksi termal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi

termal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul (McCabe, 1993).

Terdapat hubungan matematik antara laju perpindahan kalor secara konduksi dengan gradien suhu normal, yang dikenal dengan Hukum Fourier, (JP. Holman, 1986):

$$q_{\text{kond}} = -k.A.dT/dx \quad (19)$$

dimana

- q_{kond} = laju perpindahan kalor secara konduksi
- dT/dx = gradien suhu ke arah kalor perpindahan kalor
- k = konduktivitas termal bahan
- A = luas bidang aliran kalor, untuk silinder $2\pi rL$

Maka:

$$q_{\text{kond}} = -k. 2\pi rL.dT/dr \quad (20)$$

dengan kondisi batas: $T = T_w$ pada $r = r_1$
 $T = T_A$ pada $r = r_o$

Sehingga (Persamaan 25) dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$q_{\text{kond}} = \frac{2.\pi.k.L.(T_A - T_w)}{\ln \left(\frac{r_o}{r_1} \right)} = \frac{(T_A - T_w)}{\frac{\ln \left(\frac{r_o}{r_1} \right)}{2.\pi.k.L}} \quad (21)$$

2.6.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara ikut bergerak mengalir dalam perambatan panas atau proses perpindahan panas dari satu titik ke titik lain dalam fluida antara campuran fluida dengan bagian lain.

Arus fluida yang melintas pada suatu permukaan, maka akan ikut terbawa sejumlah entalpi. Aliran entalpi ini disebut aliran konveksi kalor atau konveksi. Konveksi merupakan suatu fenomena makroskopik dan hanya berlangsung bila ada gaya yang bekerja pada partikel atau ada arus fluida yang dapat membuat

gerakan melawan gaya gesek (McCabe, 1993). Kalor dipindah secara konveksi dinyatakan dengan persamaan Newton tentang pendinginan (Holman, 1986).

Dikutip dari JP. Holman (1986), didapat hubungan matematik antara laju perpindahan kalor secara konveksi dengan koefisien perpindahan panas konveksi (h):

$$q_{konv} = h_{io} \cdot A \cdot (T_F - T_V) \quad (22)$$

dimana

q_{konv} = laju perpindahan kalor konveksi

h_{io} = koefisien perpindahan panas konveksi

T_F = temperatur film, dimana besar temperatur film adalah:

$$T_F = \frac{T_V + T_w}{2}$$

T_V = temperatur fluida dalm tube

Menentukan koefisien perpindahan panas konveksi (h_{io}):

$$h_{io} = jH \cdot \left[\frac{k}{De} \right] \cdot \left[\frac{c \cdot \mu}{k} \right]^{1/2} \cdot \phi \quad (23)$$

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{ID}{OD} \quad (24)$$

Ada dua macam perpindahan panas secara konveksi, yaitu:

a. Konveksi Bebas (*Natural Convection*)

Merupakan proses perpindahan panas yang berlangsung secara alamiah, dimana perpindahan panas dalam molekul-molekul dalam zat yang dipanaskan terjadi dengan sendirinya tanpa adanya tenaga dari luar. Konveksi bebas/alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain aliran udarayang melintasi radiator panas (McCabe, 1993).

b. Konveksi Paksa (*Forced Convection*)

Merupakan proses perpindahan panas yang terjadi karena adanya bantuan dari luar, misalnya pengadukan. Jika dalam suatu alat tersebut dikehendaki pertukaran panas, maka perpindahan panas terjadi secara konveksi dipaksa

karena laju panas yang dipindahkan naik dengan adanya pengadukan (McCabe, 1993).

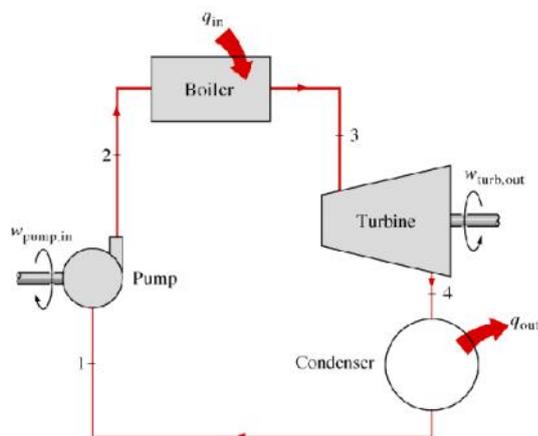
2.6.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan), absorpsi (diserap) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, sebagai contoh memantulkan sebagian besar radiasi yang jatuh padanya, sedangkan permukaan yang berwarna hitam dan tidak mengkilapakan menyerap radiasi yang diterimanya diubah menjadi kalor. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari. Menurut Hukum Stefan Boltzmann tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan (dari benda hitam) dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan benda (Artono Koester, 2002).

2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Siklus Rankine

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), dan gas.

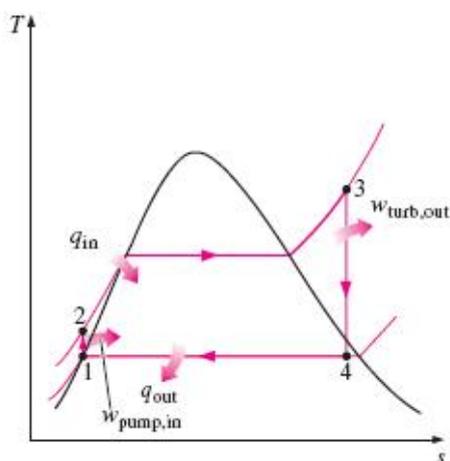
Konversi energi tingkat yang pertama yang terjadi di pembangkit listrik tenaga uap adalah konversi energi primer menjadi energi panas (Kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam *steam drum*. Uap dari *steam drum* dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanis dari turbin uap dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator (Marsudi, 2005). Secara skematis proses pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Siklus Rankine, atau siklus tenaga uap, merupakan siklus teoritis paling sederhana yang mempergunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana dipergunakan pada PLTU. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal. Siklus Rankine ideal dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Siklus Rankine Sederhana

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

- 1 – 2 Kompresi isentropik dengan pompa
- 2 – 3 Penambahan panas dalam boiler secara isobar
- 3 – 4 Ekspansi isentropik pada turbin
- 4 – 1 Pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isothermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh *boiler* ke air pada tekanan yang tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai *steam generator*. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari steam akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini (Cengel dan Boles, 1994).

Efisiensi Termal Siklus

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja pada *boiler* yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto. Secara matematis dapat dihitung dengan Persamaan 25.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} \quad (25)$$

Q_H merupakan kalor masukan yang dikonversikan menjadi kerja berguna plus kalor yang keluar pada suhu rendah, dimana:

$$Q_H = W + Q_C \quad (26)$$

$$\text{Jadi, } W = Q_H - Q_C \quad (27)$$

Dari persamaan (25) dan (27) diperoleh efisiensi siklus seperti pada persamaan (28) dan (29).

$$= \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (28)$$

$$= 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \quad (29)$$

atau

$$= 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (30)$$

berbagai efisiensi tertinggi akan dicapai apabila Q_C dapat dibuat kecil. Jadi yang diinginkan adalah untuk memasukkan energi sebagai panas pada temperatur setinggi mungkin dan membuang energi sebagai panas pada temperatur serendah mungkin (Giancoli, 1997; Reynolds dan Perkins, 1977).

2.8 Ketel Uap (*Boiler*)

Ketel Uap (*boiler*) merupakan mesin kalor (*thermal engineering*) yang mentransfer energi-energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha) (Muin, 1988). *Boiler* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin, 2009). *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Sistem *boiler* terdiri dari: sistem air umpan (*feed water system*), sistem steam (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*). Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem *steam* (*steam sistem*) mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam *boiler*. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar (*fuel sistem*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan (Febriana, 2008).

Boiler berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. *Boiler* terdiri dari 2 komponen utama, yaitu (Poernomoe, 2009):

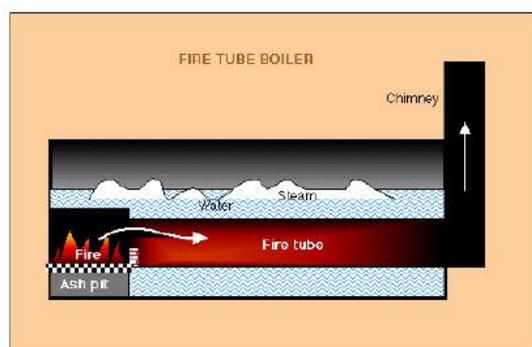
1. Dapur (*furnace*) sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. Alat penguap (*evaporator*) yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi potensial uap (energi panas).

Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbungan (*drum*) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing (Muin, 1988).

2.8.1 Jenis-Jenis *Boiler* Berdasarkan Tipe Pipa

a. Ketel Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Pada ketel pipa api (*fire tube boiler*), nyala api dan gas panas yang dihasilkan pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dan Karnowo, 2008). Untuk lebih jelasnya, *fire tube boiler* dapat dilihat pada Gambar 15.



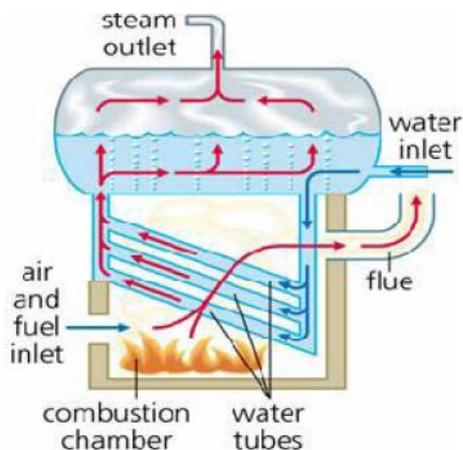
Gambar 15. *Fire Tube Boiler*

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)

Sebagai pedoman, *fire tube boiler* kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boiler* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar *fire tube boiler* dikonstruksi sebagai “paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar (UNEP, 2006).

b. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Ketel pipa air (*water tube boiler*) banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari *water tube boiler* berkebalikan dengan *fire tube boiler*, gas pembakaran dari *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan (Raharjo dan Karnowo 2008). Untuk lebih jelasnya, boiler pipa api dapat dilihat pada Gambar 16.



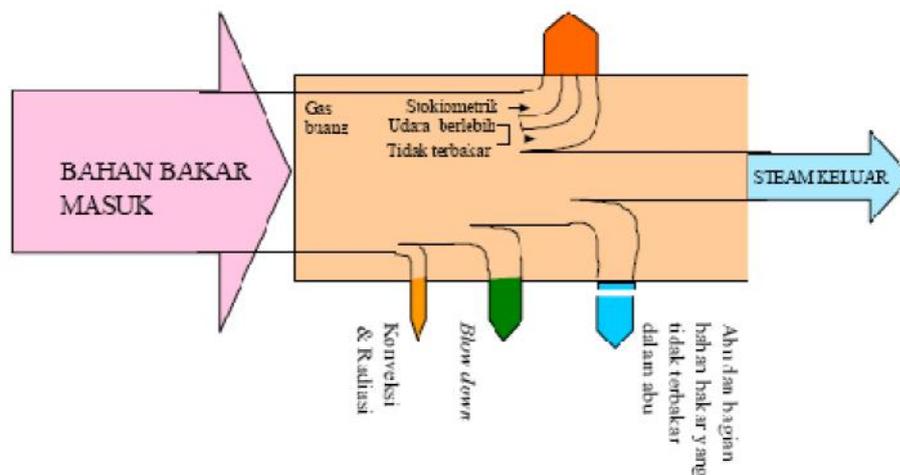
Gambar 16. Water Tube Boiler

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)

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 (UNEP, 2006).

2.8.2 Neraca Kalor

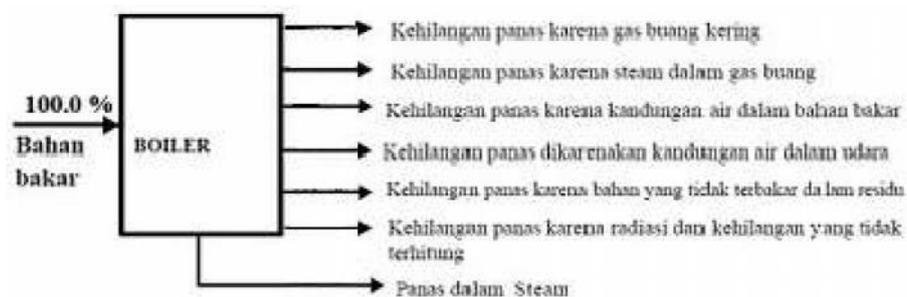
Parameter kinerja *boiler*, seperti efisiensi dan rasio penguapan, berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Bahkan untuk *boiler* yang baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mengakibatkan buruknya kinerja *boiler*. Neraca panas dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Uji efisiensi *boiler* dapat membantu dalam menemukan penyimpangan efisiensi *boiler* dari efisiensi terbaik dan target area permasalahan untuk tindakan perbaikan. Proses pembakaran dalam *boiler* dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi (UNEP, 2006). Gambar 17 menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi. Panah tebal menunjukkan jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing.



Gambar 17. Sistem Neraca Massa dan Panas

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)

Gambar 17 merupakan diagram neraca energi yang menggambarkan keseimbangan energi total yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan boiler dalam bentuk yang berbeda. Gambar 18 memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan steam.



Gambar 18. Rugi-Rugi pada Boiler

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)

Kehilangan energi dapat dibagi kedalam kehilangan yang tidak dapat dihindarkan dan kehilangan yang dapat dihindarkan. Tujuan dari pengkajian energi adalah agar rugi-rugi/kehilangan dapat dihindari, sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi. Rugi-rugi yang dapat diminimalisasi antara lain (UNEP, 2006):

- Kehilangan gas cerobong:
 - Udara berlebih (diturunkan hingga ke nilai minimum yang tergantung dari teknologi *burner*, operasi (kontrol), dan pemeliharaan).
 - Suhu gas cerobong (diturunkan dengan mengoptimalkan perawatan (pembersihan), beban; *burner* yang lebih baik dan teknologi boiler).
- Kehilangan karena bahan bakar yang tidak terbakar dalam cerobong dan abu (mengoptimalkan operasi dan pemeliharaan; teknologi *burner* yang lebih baik).
- Kehilangan dari *blowdown* (pengolahan air umpan segar, daur ulang kondensat).
- Kehilangan kondensat (manfaatkan sebanyak mungkin kondensat).
- Kehilangan konveksi dan radiasi (dikurangi dengan isolasi boiler yang lebih baik).

2.9 Superheater

Superheater adalah piranti penting pada unit pembangkit uap. Tujuannya adalah untuk meningkatkan temperatur uap jenuh tanpa menaikkan tekanannya. Biasanya piranti ini merupakan bagian integral dari ketel, dan ditempatkan dijalur

gas asap panas dari dapur. Gas asap ini digunakan untuk memberikan panas lanjut pada uap.

Superheater memproduksi *superheated steam* atau uap kering. Uap air ini menyimpan lebih banyak energi panas daripada uap air *saturated* (uap air basah), ditandai dengan nilai entalpi yang lebih tinggi. Uap air yang diproduksi oleh boiler konvensional umumnya hanya mencapai fase *saturated*, dan pada *superheater*, uap air *saturated* ini akan dipanaskan lebih lanjut mencapai fase *superheated*. Selain menyimpan energi panas yang lebih besar, uap air *superheater* juga menghilangkan sifat basah dari uap *saturated* sehingga tidak akan terjadi kondensasi yang terlalu cepat di dalam mesin yang menggunakan uap air tersebut.

2.10 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin tenaga yang berfungsi untuk mengubah energi thermal (energi panas yang terkandung dalam uap) menjadi energi poros (putaran). Sebelum energi thermal (*enthalpy*) diubah menjadi energi poros, energi tersebut diubah dulu menjadi energi kinetik. Secara umum, sebuah turbin uap secara prinsip terdiri dari dua komponen berikut (Yunus, 2010):

1. Nosel (*nozzle*), dimana energi panas dari uap tekanan tinggi diubah menjadi energi kinetik, sehingga uap keluar nosel dengan kecepatan sangat tinggi.
2. Sudu, yang merubah arah dari uap yang disemprotkan nosel, sehingga akan bekerja gaya pada sudu karena perubahan momentum dan memutar turbin.

2.10.1 Prinsip Kerja Turbin Uap

Suatu turbin dapat terdiri dari satu dua atau banyak silinder yang merupakan mesin rotasi berfungsi untuk merubah energi panas menjadi energi mekanik. Tiap silinder memiliki sebuah rotor yang disangga oleh bantalan-bantalan. Rotor-rotor tersebut disambung menjadi satu termasuk rotor generator. Ruang diantara rotor dengan rumah turbin (*casing*) terdiri dari rangkaian sudu-sudu tetap dan sudu-

sudu gerak yang dijajarkan berselang-seling.

Sudu-sudu tetap dipasang disekeliling bagian dalam rumah turbin, sedang rangkaian sudu gerak dipasang pada rotor. Bila kedalam turbin dialirkan uap, maka energi panas yang dikandung uap akan diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros.

Mula-mula energi panas dalam uap diubah terlebih dahulu menjadi energi kinetik (kecepatan) dengan cara melewatkan uap melalui nosel-nosel. Uap berkecepatan tinggi kemudian diarahkan ke sudu-sudu sehingga menghasilkan putaran poros turbin dimana energi mekanik ini selanjutnya dapat digunakan untuk menggerakkan generator, pompa dan sebagainya.

Perubahan energi panas menjadi energi kinetik terjadi didalam nosel (sudu diam) turbin, sedangkan perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor turbin terjadi pada sudu jalan turbin

Jadi didalam turbin, uap mengalami proses ekspansi yaitu penurunan tekanan dan mengalir secara kontinyu. Akibat pengurangan tekanan uap didalam rangkaian sudu-sudu, maka kecepatan uap meningkat sangat tinggi. Kecepatan aliran uap tersebut akan bergantung pada selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi. Selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi didalam turbin dinamakan penurunan panas/*heat drop* (Pusdiklat PLN, 2006).

2.10.2 Klasifikasi Turbin Uap

Ditinjau dari cara kerja transfer energi uap ke poros, turbin uap dapat dibedakan atas dua tipe:

- a. Turbin impuls
- b. Turbin reaksi

a. Turbin Impuls

Turbin impuls pertama kali dibuat oleh Branca pada tahun 1629, konstruksinya diperlihatkan pada Gambar 21 dan 22. Dimana pancaran uap yang keluar dari nosel menghembus daun-daun rotor (disebut blades) sehingga rotor berputar.

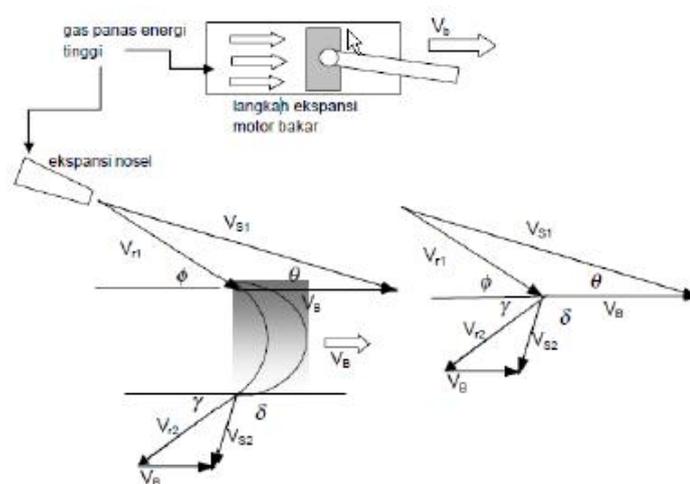
Sudu impuls juga disebut sudu aksi atau sudu tekanan tetap, adalah sudu dimana uap mengalami ekspansi hanya dalam sudu-sudu tetap. Sudu-sudu tetap berfungsi sebagai nosel (saluran pancar) sehingga uap yang melewati akan mengalami peningkatan energi kinetik.

Turbin impuls adalah turbin yang mempunyai roda jalan atau rotor dimana terdapat sudu-sudu impuls. Sudu-sudu impuls mudah dikenali bentuknya, yaitu simetris dengan sudut masuk dan sudut keluar yang sama (20°), pada turbin biasanya ditempatkan pada bagian masuk dimana uap bertekanan tinggi dengan volume spesifik rendah. Bentuk turbin impuls pendek dengan penampang yang konstan.

Ciri yang lain adalah secara termodinamika penurunan energi terbanyak pada nosel, dimana pada nosel terjadi proses ekspansi atau penurunan tekanan. Sudu-sudu turbin uap terdiri dari sudu tetap dan sudu gerak. Sudu tetap berfungsi sebagai nosel dengan energi kinetik yang naik, sedangkan pada sudu bergerak tekanannya konstan.

Segitiga Kecepatan

Segitiga kecepatan adalah dasar kinematika dari aliran fluida gas yang menumbuk sudu turbin. Segitiga kecepatan sudu turbin dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Segitiga Kecepatan pada Suatu Turbin Impuls

(Masagus S Rizal, 2013)

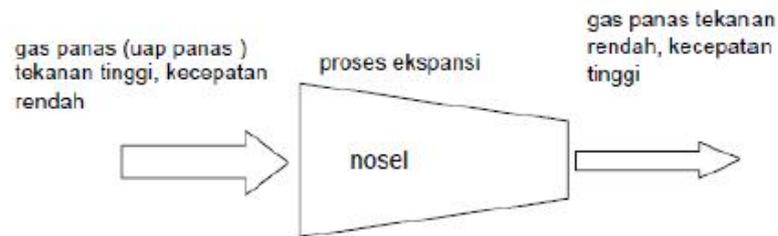
Keterangan Gambar 19:

V_{S1}	= kecepatan absolut fluida meninggalkan nosel
V_B	= kecepatan sudu
V_{R1}	= kecepatan relatif fluida
V_{R2}	= kecepatan relatif fluida meninggalkan sudu
V_{S2}	= kecepatan absolut fluida meninggalkan sudu
	= sudut nosel
	= sudut masuk sudu
	= sudut keluar sudu
	= sudut ke luar fluida

dari segitiga kecepatan pada Gambar 19, panjang pendeknya garis adalah mewakili dari besar kecepatan masing-masing. Sebagai contoh, fluida masuk sudu dari nosel dengan kecepatan V_{S1} kemudian keluar nosel sudah berkurang menjadi V_{S2} dengan garis yang lebih pendek. Artinya sebagian energi kinetik fluida masuk sudu diubah menjadi energi kinetik sudu dengan kecepatan V_B , kemudian fluida yang sudah memberikan energinya meninggalkan sudu dengan kecepatan V_{S2} .

Proses perubahan atau konversi energi pada turbin mulai terjadi pada nosel, yaitu ekspansi fluida gas pada nosel. Pada proses ekspansi di nosel, energi fluida dan tekanan mengalami penurunan. Berbarengan dengan penurunan energi dan tekanan, kecepatan fluida gas naik karena proses ekspansi. Kemudian, fluida gas dengan energi kinetik tinggi menumbuk sudu turbin dan memberikan sebagian energinya ke sudu, sehingga sudu pun bergerak. Perubahan energi dengan tumbukan fluida di sudu adalah azas impuls.

Perubahan energi dengan azas reaksi, sudu turbin reaksi berfungsi seperti nosel. Hal ini berarti, pada sudu turbin reaksi terjadi proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan fluida gas dengan dengan dibarengi kenaikan kecepatan. Prinsip reaksi adalah gerakan melawan aksi, jadi dapat dipahami dengan kenaikan kecepatan fluida gas pada sudu turbin reaksi, sudu turbin pun akan bergerak sebesar nilai kecepatan tersebut dengan arah yang berlawanan. Proses ekspansi dapat dilihat pada Gambar 20.



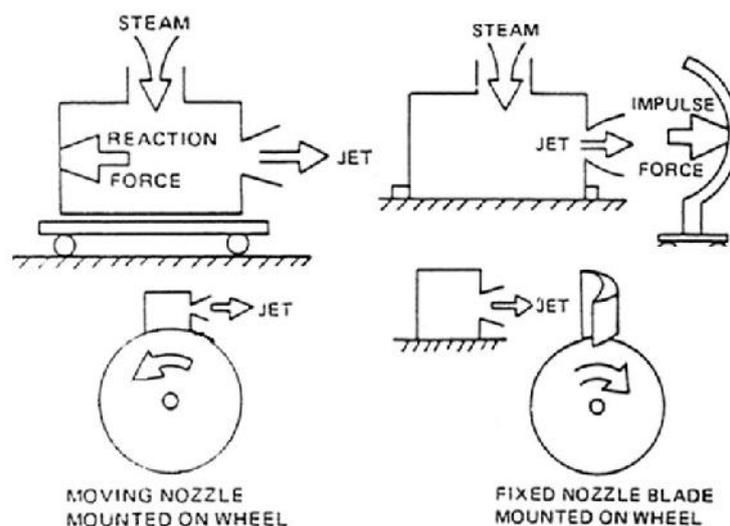
Gambar 20. Proses Ekspansi Pada Nosel

(Masagus S Rizal, 2013)

b. Turbin Reaksi

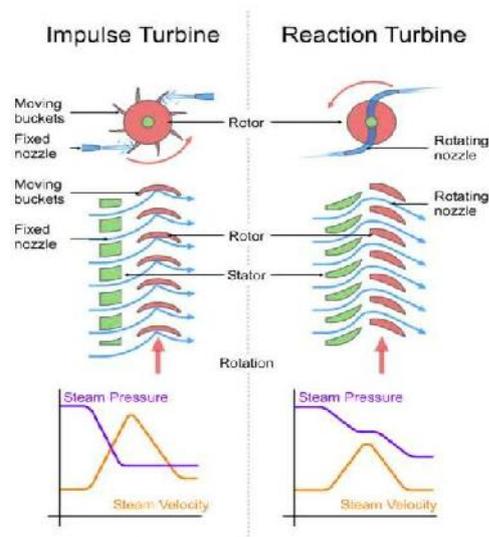
Turbin ini dirancang pertama oleh Hero, 120 tahun sebelum Masehi. Reaksi dari pancaran uap yang keluar dari ujung pipa yang disebut Nosel atau Nozzle (lihat Gambar 21 dan 22 mendorong rotor sehingga berputar).

Dalam suatu turbin yang terdiri dari 100% sudu-sudu reaksi, maka sudu-sudu gerak juga berfungsi sebagai nosel-nosel sehingga uap yang melewatinya akan mengalami peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan. Peningkatan kecepatan ini akan menimbulkan gaya reaksi yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan uap.



Gambar 21. Prinsip Dasar Sudu Reaksi dan Sudu Impuls

Sumber: Pusat Pendidikan dan Pelatihan PT. PLN (Persero) (2006)



Gambar 22. Profil dan Karakteristik Sudu Reaksi dan Impuls

Sumber: Pusat Pendidikan dan Pelatihan PT. PLN (Persero) (2006)

2.11 Generator

Generator merupakan instrumen pembangkit tenaga listrik yang mengubah energi mekanis sebagai masukan menjadi energi listrik sebagai keluaran dimana kecepatan putar dari rotornya sama dengan kecepatan putar dari statornya. Generator terdiri dari bagian yang berputar yang disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator. Kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup dari suatu penghantar, bila diberi tegangan arus searah akan menimbulkan fluks magnet. Rotor tersebut diputar dengan suatu penggerak mula atau *prime mover* sehingga fluks tersebut memotong konduktor-konduktor yang ada di stator yang selanjutnya pada kumparan stator akan terimbas tegangan.