

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Ketel Uap

Ketel Uap adalah suatu bejana bertekanan yang tertutup, air dipanaskan dengan memakai bahan bakar antara lain bahan bakar padat dan bahan bakar cair, bahan bakar gas. Steam boiler merupakan suatu bejana tertutup yang memiliki tekanan dan berisi air lalu dipanaskan dengan menggunakan bahan bakar baik yang berbentuk padat, cair maupun gas, dari hasil pemanasan yang dilakukan akan menghasilkan steam. *Steam* boiler atau lebih dikenal sebagai ketel uap yakni alat yang digunakan sebagai pengering atau pengubah konsentrasi molekul air menjadi konsentrasi molekul uap air yang akan dipakai untuk proses pengolahan pada pabrik manufaktur khususnya pabrik kelapa sawit yang memproduksi minyak mentah.

Untuk mengetahui lebih lanjut mengenai boiler, kita harus memahami beberapa faktor - faktor yang dapat mempengaruhi kinerja atau system kerja dari ketel uap. Ada empat faktor yang dominan dalam mempengaruhi sistem kerja dari ketel uap antara lain

- 1). Tekanan
- 2). Suhu
- 3). Kapasitas
- 4). Efisiensi

Tekanan adalah hasil berupa dorongan atau tekanan yang dihasilkan dari *steam boiler*. Tekanan pada boiler menunjukkan seberapa jauh beban kerja dari boiler didalam bekerja dan hal ini dapat dilihat dari alat yang digunakan sebagai pengukur tekanan. Semakin rendah tekanan yang dihasilkan pada boiler, maka semakin baik pula boiler bekerja.



Gambar 2.1.a .Alat Ukur Tekanan

Temperatur adalah panas yang dihasilkan steam boiler. Temperatur biasanya diukur dalam satuan *Celcius* atau *Kelvin*. Temperatur yang tinggi sangat dipengaruhi lamanya mesin bekerja. Temperatur *Steam Boiler* ada dua jenis, yaitu

- 1). Super Heater Steam, temperature yang dihasilkan adalah sesuai rancangan yang dikehendaki pada boiler.
- 2). Saturated Steam (uap jenuh), temperatur yang dihasilkan segaris dengan tekanan.



Gambar 2.1.b Alat Ukur Suhu

Kapasitas adalah kemampuan maksimum Boiler untuk menghasilkan uap dalam setiap ton/jam. Untuk mencari kapasitas boiler rumus yang digunakan adalah :

$$Q = \frac{\eta \times G_{bb} \times N.O}{\Delta \text{ Enthalpi}}$$

Dimana ;

- Q = Kapasitas kg/hr
- η = Efisiensi Boiler %
- G_{bb} = Berat bahan bakar kg/hr
- N.O = Nilai kalor kkal/kg
- $\Delta \text{ Enthalpi}$ = Perbedaan Enthalpi uap dan Enthalpi air kkal/kg

Efisiensi adalah suatu ukuran berapa banyak steam yang dihasilkan dalam setiap ton bahan bakar di dalam ruang dapur. Rumus yang digunakan untuk mendapatkan efisiensi adalah :

$$\eta = \frac{Q(\Delta \text{ Enthalpi})}{G_{bb} \times N.O} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana ;

- Q = Kapasitas kg/hr
- η = Efisiensi Boiler %

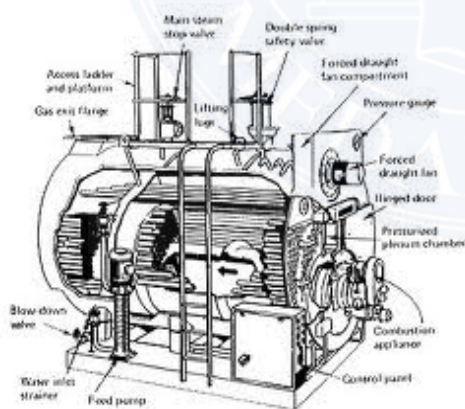
- G_{bb} = Berat bahan bakar kg/hr
 $N.O$ = Nilai kalor kkal/kg
 $\Delta Enthalpi$ = Perbedaan Enthalpi uap dan Enthalpi air kkal/kg

2.1.1 Pengertian Dasar Ketel Uap

Konstruksi ketel uap berkaitan erat dengan sifat yang dimiliki air, terutama uap serta peristiwa yang terjadi pada proses pembentukan uap. Kenaikan temperatur air terjadi, karena panas yang diberikan oleh nyala (gas asap) kepada air melalui dinding ketel yang bersinggungan langsung dengan air. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka ketel diklasifikasikan sebagai berikut :

1 Ketel Pipa Api

Dimana fluida yang mengalir dalam pipa nyala api (hasil pembakaran) yang ditransfer ke fluida air melalui bidang pemanas . Tujuan pipa api ini adalah untuk memudahkan distribusi panas ke air. Umumnya ketel ini digunakan untuk kapasitas uap yang kecil karena permukaan bidang yang dipanasi terbatas yang berarti hanya pada permukaan pipa - pipa api saja.



Gambar 2.2.a Ketel Pipa Api

2. Ketel Pipa Air

Pada pipa ini yang mengalir dalam pipa adalah air, sedangkan energi panas dipancarkan dari luar pipa (ruang bakar) ke air. Umumnya ketel ini digunakan untuk produksi uap dengan kapasitas yang besar.



Gambar 2.2.b. Ketel Pipa Air

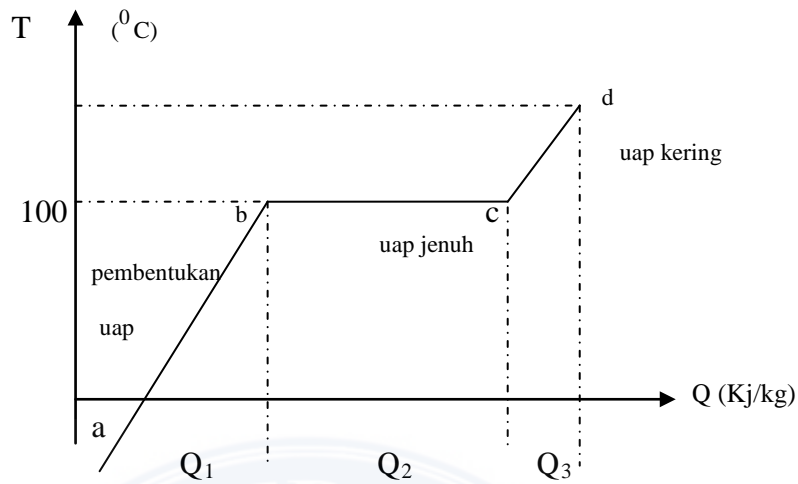
2.2 Proses Pembentukan Uap

Untuk merubah energi panas menjadi energi mekanis diperlukan suatu media kerja . Dalam hal ini media kerja yang digunakan adalah uap. Uap dalam ketel yang dimaksud adalah uap air, yaitu gas yang timbul akibat perubahan fase air menjadi uap melalui proses pemanasan.

Keuntungan penggunaan uap sebagai media kerja adalah :

- 1). Mempunyai kemampuan untuk menerima kalor dalam jumlah yang besar.
- 2). Dihasilkan dari material yang murah dan mudah diperoleh.
- 3). Dapat bekerja pada tekanan tinggi .
- 4). Tidak terbakar dan tidak beracun.
- 5). Cepat menghantarkan panas.

Proses pembentukan uap dapat dilihat sebagai gambar berikut ini



Gambar 2.3. Grafik Hubungan T – Q

Keterangan gambar 2.1. :

a-b = panas yang diberikan menaikkan suhu air dari 0⁰C menjadi 100⁰C di bawah pemanasan hingga (100⁰C di bawah tekanan atmosfer 1 atm = 1,003 kg/cm) dimana proses ini terjadi pada *sesible heat*.

b-c = panas yang diberikan merubah fase dari 100⁰C air menjadi 100⁰C uap jenuh (*pada laten heat*).

c-d = panas yang diberikan menaikkan suhu 100⁰C uap jenuh menjadi uap kering (pemanas uap lanjut) pada proses *sensible heat*.

Pada tekanan 1 atm dan 100⁰C air akan berubah menjadi uap dan apabila dipanaskan terus menerus maka seluruhnya akan berubah menjadi uap. Pada pemanasan air dari temperatur t₁ ⁰C menjadi 100⁰C dibutuhkan kalor (Q), maka kalor yang dibutuhkan adalah :

$$Q_1 = m a \cdot C_p \cdot \Delta t_1 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana ;

m_a = massa air (kg/satuan waktu)

C_p = panas spesifik air (kkal/kg)

$\Delta t_1 = (100^{\circ}\text{C} - t_1)$

Bila pemanasan terus dilanjutkan, maka volume uap bertambah sampai seluruh air berubah menjadi uap dan temperatur air tidak naik, maka tekanannya juga tetap, kalor yang dibutuhkan untuk perubahan fase ini adalah :

$$Q_2 = m_u \cdot Q_1 \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana ;

m_u = massa uap (kg)

Q_1 = panas laten (penguapan) (kkal/kg⁰C)

Selanjutnya bila uap air terus dipanaskan, maka temperatur uap air akan naik dan kenaikan temperaturnya sebanding dengan kalor yang diterima yaitu :

$$Q_3 = m_u \cdot C_{ps} \cdot \Delta t_2 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana ;

m_u = massa uap (kg)

C_{ps} = panas spesifik uap (kkal/kg⁰C)

$\Delta t_2 = (t_1 - 100^{\circ}\text{C})$

Dalam tulisan ini, hanya memakai fase cair dan fase uap, perubahan fase cair menjadi fase uap dan sebaliknya fase uap menjadi fase cair. Proses perubahan fase yang terjadi di dalam ketel (boiler) adalah fase cair menjadi fase uap

2.2.1 Fase Uap

Yaitu bila mana dalam keseimbangan, tekanan (P), volume (V), dan temperatur (T) tidak berubah. Bentuk fisis air adalah dalam bentuk cair jenuh dengan berat jenis 1 kg/dm³ (teoritis). Jika suhu dinaikkan hingga 100⁰C pada

tekanan 1 atm, maka air tersebut akan berubah fase berbentuk uap, tetapi bila di atas air tersebut diberikan tekanan, sehingga gelembung - gelembung uap tidak dapat terbentuk dan proses penguapan tidak dapat berlangsung meskipun sudah mencapai suhu 100⁰C. jadi proses dalam mencapai titik keseimbangan pada P, V, dan T tidak berubah, maka selama itu disebut fase cair.

Yaitu bila mana suhu air dinaikkan, sehingga bentuk keseimbangannya hilang, maka air berubah fase cair menjadi fase uap atau menguap, fase uap dapat terjadi atau berlangsung dalam ruang tertutup ataupun terbuka. Keadaan uap yang dihasilkan dapat berbentuk :

- 1). Uap basah, yaitu uap yang masih mengandung butiran - butiran yang halus dari air.
- 2). Uap jenuh, yaitu uap yang berada diantara uap basah dan uap kering (uap yang tidak mengandung butiran air lagi).
- 3). Uap panas lanjut (uap kering), yaitu uap yang dihasilkan dengan proses pemanasan lanjut dari uap jenuh.

2.3. Kebutuhan Uap di Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit

Kapasitas penguapan adalah berat (jumlah) uap dalam kgper jam atau ton per jam, atau dalam kg per jam, untuk kebutuhan uap tertentu. Untuk menentukan kapasitas uap yang dihasilkan suatu bahan dengan rumus sebagai berikut :

$$W_s = \frac{W_f \cdot LHV \cdot \eta_k}{(H_{sat} - H_a)} \text{ (kg / jam)}$$

Dimana ;

W_f = Jumlah bahan bakar sisa pengolahan.

LHV = Nilai kalor bawah (kkal/kg)

H_{sat} = Enthalpi uap saturasi air pada tekanan 20 kg/cm² (data survey)

H_a = Enthalpi air masuk ketel (kkal/kg)

η_k = Efisiensi ketel (0,07–0,9)

Pada pabrik pengolahan buah kelapa sawit, uap digunakan untuk membantu proses pengolahan buah pada masing - masing proses. Uap tersebut berasal dari uap bekas yang telah dipergunakan turbin yang berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik. Sistem distribusi uap yang digunakan adalah sistem seri by pass.

2.4. Bahan Bakar

Bahan bakar adalah segala bahan yang dapat terbakar dimana bahan bakar banyak kita jumpai di sekeliling kita seperti kertas, kayu, minyak tanah dan lain - lain. Selain itu, batu juga dapat terbakar misalnya batu bara. Bahan bakar merupakan komponen utama dalam pembakaran. Jadi untuk melakukan pembakaran diperlukan tiga unsur, yaitu :

- 1). Bahan bakar
- 2). Udara pembakaran (oksigen)
- 3). Suhu (panas)

Panas (kalor) yang timbul karena pembakaran bahan bakar tersebut disebut hasil pembakaran atau nilai bakar

2.4.1 Jenis - Jenis Bahan Bakar

Adapun jenis - jenis bahan bakar, yaitu :

- 1). Bahan bakar padat
- 2). Bahan bakar cair

3). Bahan bakar gas

Bahan bakar tersebut dapat digolongkan menjadi dua bagian, yaitu :

1). Bahan bakar alam

2). Bahan bakar buatan

Dalam penulisan ini bahan bakar yang digunakan untuk ketel di Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit ialah cangkang dan sabut , termasuk bahan bakar padat alami

2.4.2. Bahan bakar cangkang

Cangkang merupakan limbah dari hasil pengolahan kelapa sawit, dimana cangkang merupakan bagian dari buah kelapa sawit yang dihasilkan setelah melalui proses pengolahan pada stasiun kerja pengolahan biji dimana pada stasiun kerja ini, biji dari pemisah biji dan sabut (depericarper) akan dikutip, dipecah oleh Ripple Mill dan dipisahkan antara inti dan cangkang oleh LTDS



Gambar 2.4. (a). *Depericarper*, (b). *Ripple Mill*, dan (c). *LTDS*

2.4.3. Sabut

Sabut merupakan limbah padat hasil pengolahan kelapa sawit, dimana sabut merupakan bagian dari buah kelapa sawit yaitu kulit luar dari buah kelapa sawit atau disebut dengan daging buah kelapa sawit.

Berondolan buah kelapa sawit dari mesin *Theresser* akan masuk ke dalam *Degester* untuk dilumatkan sehingga daging buah terpisah dari biji. Kemudian sabut dihasilkan melalui proses pemerasan pada mesin *Screw Press*.



Gambar 2.4. (a). Degester, dan (b). Screw Press



Gambar 2.6. Pengolahan Cangkang Sawit Pada Pabrik PKS

2.4.4 Nilai Kalor Bahan Bakar

Nilai kalor bahan bakar adalah banyaknya energi panas yang diperoleh pada proses pembakaran sempurna dari sejumlah bahan bakar. Nilai kalor bahan bakar terdiri atas dua bagian :

1. Nilai Kalor Atas

Yaitu banyaknya panas yang diperoleh pada proses pembakaran sempurna dari 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap air (*Syamsir A. Muin*).

$$\text{HHV} = 8080 \cdot C + 34460 \cdot (\text{H}_2) + 2220 \cdot S \text{ (kkal/kg)} \dots \dots \dots (2.6)$$

2. Nilai Kalor Bawah

Yaitu banyaknya panas yang diperoleh pada proses pembakaran sempurna dari 1 kg bahan bakar tanpa memperhitungkan panas kondensasi uap air.

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 9 \cdot \text{H}_2 \cdot 586 \text{ (kkal/kg}_{\text{bb}}) \dots \dots \dots (2.7)$$

2.4.5 Pemakaian Bahan Bakar

Suplai bahan bakar merupakan salah satu factor penting bagi kinerja ketel, untuk menentukan jumlah pemakaian bahan bakar digunakan rumus sebagai berikut

$$W_f = \frac{W_s (H_{\text{sat}} - H_a)}{\eta_k \cdot \text{LHV}} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana ;

W_s = jumlah bahan bakar sisa pengolahan

LHV = nilai Kalor bawah (kkal/kg_{bb})

H_{sat} = enthalpi uap saturasi air pada tekanan 30 kg/cm²

H_a = enthalpi air masuk ketel (kkal/kg)

$$\eta_k = \text{Efisiensi ketel} (0,07 - 0,90)$$

2.4.6 Kebutuhan Udara Pembakaran

Untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna maka dibutuhkan faktor udara lebih (*excess air*). Udara teoritis ditambah *excess air* sama dengan udara aktual, biasanya udara lebih 100 % dari udara minimal yang lebih maju hanya membutuhkan sekitar 25 – 50 tergantung dari kebaikan mesinnya. Rumus empiris untuk menghitung excess air adalah:

$$W_{a_t} = \frac{2,66 C + 7,94 H_2 + 0,998 O_2}{0,232} \text{ kg / kg} \dots\dots\dots(2.9)$$

Atau

$$V_{a_t} = \frac{1,865 C + 5,56 H_2 + 0,7 O_2}{0,21} \text{ kg / kg} \dots\dots\dots(2.10)$$

Agar pembakaran terjadi secara sempurna factor udara lebih, maka volume udara pembakaran sebenarnya adalah :

$$(V_a)_{act} = (V_a)_{th} \cdot 0,5 + (V_a)_{th} \dots\dots\dots(2.11)$$

(m³_{sat}/kg_{bb})

Volume udara pembakaran yang dibutuhkan setiap jamnya :

$$(V_a)_{act} = W_f \cdot (V_a)_{act} \dots\dots\dots(2.12)$$

(m³_{sat}/kg_{bb})

2.4.7 Analisa Gas Asap

Gas asap terbentuk dari hasil pembakaran dan gas - gas sisa pembakaran. Pada pembakaran sempurna gas asap terdiri dari komponen - komponen : karbon dioksida, dioksida belerang, air (uap), dan sisa - sisa udara pembakaran seperti unsur - unsur Nitrogen, dan Oksigen. Pada umumnya gas asap terbentuk dari hasil

pembakaran dan gas sisa hasil pembakaran. Pada pembakaran yang sempurna, gas
- gas asap terbentuk dari :

1. Hasil pembakaran :
 - a). Karbon dioksida (CO₂)
 - b). Air (H₂O)
 - c). Sulfur dioksida (SO₂)
2. Gas sisa udara pembakaran
 - a). Nitrogen (N₂)
 - b). Oksigen (O₂)

Analisa berat gas asap hasil pembakaran per kilogram bahan bakar :

a. Karbon dioksida (CO₂)



$$12 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 44 \text{ kg CO}_2$$

$$1 \text{ kg C} + 2,67 \text{ kg O}_2 = 3,67 \text{ kg CO}_2$$

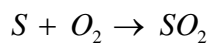
Artinya setiap pembakaran 1 kg karbon (C) dibutuhkan 2,67 kg oksigen (O₂),
sehingga menghasilkan 3,67 kg CO₂.

Maka ;

$$W_{\text{co}_2} = 3,67 C$$

$$(\text{kg/kg}_{\text{bb}})\dots\dots\dots(2.14)$$

b. Sulfur dioksida (SO₂)



$$32 \text{ kg S} + 32 \text{ kg O}_2 = 64 \text{ kg SO}_2$$

$$1 \text{ kg S} + 1 \text{ kg SO}_2 = 2 \text{ kg SO}_2$$

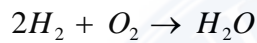
Jadi setiap pembakaran 1 kg sulfur (S) dibutuhkan 1 kg oksigen (O₂), sehingga menghasilkan 2 kg SO₂.

Maka :

$$W_{SO_2} = 2 \cdot S$$

$$(kg/kg_{bb}) \dots \dots \dots (2.15)$$

c. Air (H₂O)



$$4 \text{ kg H} + 32 \text{ kg O}_2 = 36 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$1 \text{ kg H} + 8 \text{ kg O}_2 = 9 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Jadi setiap pembakaran 1 kg hidrogen (H) dibutuhkan 8 kg oksigen (O₂), sehingga menghasilkan 9 kg H₂O.

Maka :

$$W_{H_2O} = 9 \cdot H_2$$

$$(kg/kg_{kg_{bb}}) \dots \dots \dots (2.16)$$

d. Excess oksigen (O₂)_{excess}

$$(W_{O_2})_{\text{Excess}} = (\text{Excess}_{\text{air}} \times 23,2 \% (W_a)_{\text{th}}) + O_2 \quad (kg/kg_{kg_{bb}})$$

e. Nitrogen (N₂)

$$W_{N_2} = 77 \% \cdot (W_a)_{\text{act}} \quad (kg/kg_{kg_{bb}})$$

Sehingga berat gas asap basah (W_g)_{basah} :

$$(W_g)_{\text{basah}} = W_{CO_2} + W_{SO_2} + W_{H_2O} + (W_{O_2})_{\text{excess}} + W_{N_2} \quad (kg/kg_{kg_{bb}})$$

Dan diperoleh berat gas asap per jam :

$$W_g = (W_g)_{\text{basah}} \cdot W_f \quad (kg/jam)$$

Dimana ;

$$W_g = \text{berat gas asap tiap jam (m}^3\text{/jam)}$$

$$W_{g\text{basah}} = \text{berat gas asap (m}^3\text{/jam)}$$

$$W_f = \text{jumlah bahan bakar (kg}_{bb}\text{/jam)}$$

Sementara berat gas asap kering (Wg)kering :

$$(Wg)_{kering} = (Wg)_{basah} - W_{H_2O}$$

$$(\text{kg}/\text{kg}_{bb}) \dots \dots \dots (2.17)$$

2.4.8. Berat Gas Asap

Berat bahan bakar dengan udara pembakaran sama dengan berat gas asap ditambah abu, maka berat komposisi gas asap adalah :

$$Va_i = 1 + \frac{2,66C + 7,94H_2 + (0,998S - O_2)}{0,21} R - A (\text{gas}_{asap} / \text{kg}_{bb}) \dots \dots \dots (2.18)$$

Sehingga berat gas asap hasil pembakaran bahan pembakaran bahan bakar setiap jamnya adalah :

$$Wg_{total} = W_f \cdot W_g$$

$$(\text{kg}_{asap} / \text{kg}_{bb}) \dots \dots \dots (2.19)$$

2.4 9. Volume Gas Asap

Jumlah oksigen adalah 21 % dari udara, jadi $VO_2 = 21 \% (Va)_{act}$; belum termasuk oksigen yang terkandung di dalam bahan bakar.

1. Pada gas asap kering tidak mengandung H₂O terdapat 11 % (CO₂ + SO₂).

$$(Vg)_{kering} = \frac{CO_2 + S O_2}{0,11} \text{ kg / kg} \dots \dots \dots (2.20)$$

2. Volume gas asap basah (mengandung uap air) adalah

$$(Vg)_{kering} = \frac{1,866C + 0,7S}{0,11} + 1,24(9H_2 + M) \quad (\text{m}^3\text{std / kg}) \quad (2.21)$$

2.4.10 Energi Kalor Hasil Pembakaran

Energi kalor merupakan (panas) yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar (furnace). Jumlah energi kalor yang dihasilkan sering disebut dengan kapasitas ruang bakar, yang dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$Q_f = W_f \cdot \text{LHV} \cdot \eta_k$$

Dimana ;

Q_f = jumlah energi kalor (kkal/kg)

W_f = jumlah sisa bahan bakar hasil dari pengolahan ($\text{kg}_{\text{bb}}/\text{jam}$)

LHV = nilai kalor bawah ($\text{kg}_{\text{bb}}/\text{jam}$)

η_k = efisiensi ketel (0,90 – 0,97)

2.4.11 Perpindahan Panas Pada Ruang Bakar Boiler

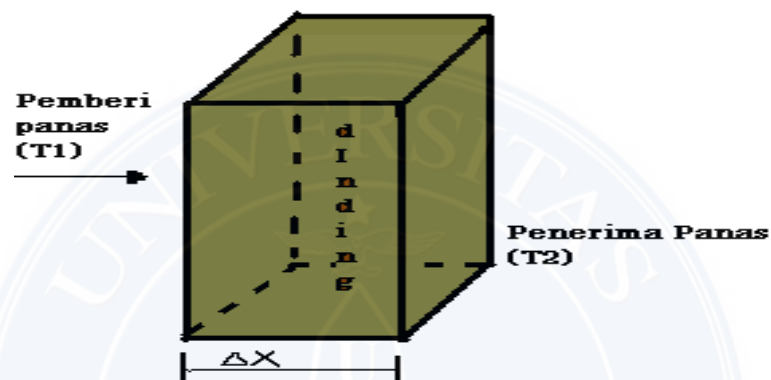
Pada dasarnya ada tiga cara perpindahan panas dimana panas dapat dipindahkan dari suatu sumber panas kebagian yang lebih dingin atau dari tempat yang bertemperatur tinggi ke tempat yang lebih rendah. Ketiga cara tersebut adalah :

- 1). Konduksi (rambatan)
- 2). Konveksi (aliran)
- 3). Radiasi (pancaran)

2.4.12 Perpindahan panas secara konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan panas melalui rambatan dari suatu benda yang dipanaskan kebagian lain dari benda tersebut yang temperaturnya lebih rendah. Perpindahan panas konduksi terjadi pada benda padat. Tetapi molekul - molekul benda padat yang satu tidak

berpindah ke benda padat yang lain. Suatu syarat terjadinya konduksi kalor pada suatu zat adalah adanya perbedaan suhu antara dua sisi benda, suhu yang lebih tinggi akan berpindah ke tempat suhu yang lebih rendah (terlihat pada gambar dibawah ini). Di dalam ketel uap, pada dinding ketel panas dirambatkan oleh molekul - molekul dinding ketel sebelah dalam yang berbatasan langsung dengan air ataupun uap.



Gambar 2.4.12 Perpindahan panas konduksi

Dari gambar diatas menunjukkan bahwa besar laju perpindahan panas konduksi menurut *J.P. Holman (1984)* dapat ditentukan :

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial X} \dots\dots\dots(2.22)$$

dimana :

Q = laju perpindahan kalor konduksi (watt)

k = hantaran thermal (watt/m⁰C)

A = luas permukaan perpindahan panas (m²)

$\frac{\partial T}{\partial X}$ = gradien suhu ke arah perpindahan kalor

Negative(-) = menandakan kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu.

2.4.13 Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas secara konveksi/aliran adalah proses perpindahan panas melalui molekul - molekul fluida cair atau gas. Bila suatu sumber pipa baja yang panas di liri oleh fluida, maka fluida tersebut akan menghantar panas ke seluruh bagian fluida.

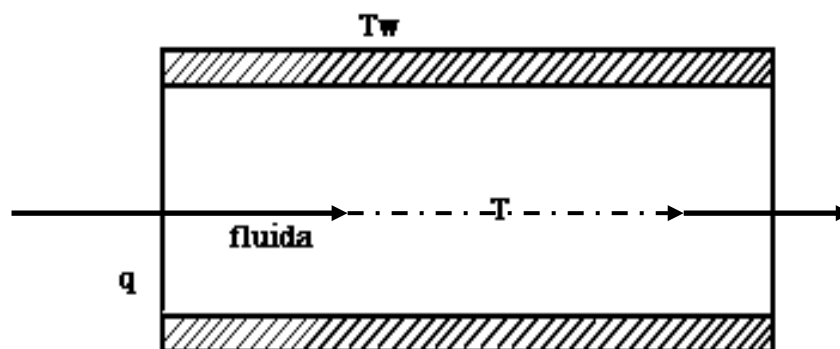
Perpindahan panas secara konveksi dapat dibagi atas dua golongan, yaitu :

a. Konveksi Alami

adalah perpindahan panas melalui fluida secara alami, misalnya dengan memanaskan sebatang pipa kemudian dibiarkan pipa tersebut menjadi dingin, fluida yang menghantar kalor adalah udara terbuka, jadi perpindahan panas yang terjadi disini adalah perpindahan panas secara konveksi alami antara dinding pipa dengan udara luar.

b. Konveksi Paksa

adalah perpindahan panas konveksi dengan menggunakan media pembantu untuk lebih mempercepat laju aliran fluida. Sebagaimana dapat dilihat pada gambar di bawah ini, yang memperlihatkan sebuah perpindahan panas konveksi paksa pada pipa dengan menggunakan pompa bila fluida cair dan menggunakan blower fluida gas.



Gambar 2.2.4.b Perpindahan panas konveksi pada pipa

Menurut JP. Holman (1988), laju perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$q = hA(T_w - T_\infty) \dots\dots\dots(2.23)$$

dimana ;

q = laju perpindahan kalor konveksi (watt)

h = koefisien perpindahan kalor konveksi (watt/m²°C)

A = luas penampang perpindahan panas (°C)

T_w = suhu permukaan pipa (°C)

T_∞ = suhu fluida yang mengalir (°C)

2.4.14 Perpindahan panas secara radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah proses perpindahan panas dari suatu sumber panas ke penerima panas secara memancar (tanpa media).

Melalui suatu gelombang elektromagnetik. Saat sumber panas memancarkan panas sebagian energinya akan diserap oleh penerima dan sebagian akan dipantulkan.

Besarnya perpindahan panas secara radiasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *J.P. Holman*, 1984 :

$$q = \sigma A(T)^4 \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana :

q = laju perpindahan kalor radiasi (watt)

σ = konstanta Stefan – Boltzmann (5.699 x 10⁻⁸ watt/m².K⁴)

A = luas permukaan (m²)

T = suhu absolut (K)

2.5. Kerugian - Kerugian Panas Pada Instalasi Ketel

Kehilangan panas di dalam ketel adalah perbedaan panas yang digunakan untuk menghasilkan uap. Macam - macam kerugian panas

2.6 Kerugian Gas Asap Kering

Merupakan kerugian panas yang terbawa oleh gas asap kering keluar dari cerobong asap. Ketika gas bekas (*flue gas*) keluar meninggalkan *airheater*, gas bekas masih mengandung sejumlah panas yang tidak lagi memiliki kesempatan untuk dimanfaatkan. Karenanya energi panas akan terus terbawa gas bekas mengalir ke cerobong dan akhirnya terbuang ke atmosfer, diklasifikasikan menjadi kerugian gas asap kering dan kerugian asap basah.

Kerugian gas asap kering adalah kerugian panas yang terbawa oleh sejumlah gas asap hasil pembakaran karbon dan sulfur. Pada dasarnya gas asap kering dan gas asap basah merupakan gas sisa yang seharusnya dapat dimanfaatkan. Ketika proses pembentukan kedua gas tersebut tidak berjalan dengan normal dan akan bercampur pada asap yang keluar dari cerobong.



Gambar 2.5.1 Cerobong Asap

Besarnya kerugian gas asap kering dapat dihitung dengan rumus :

$$Q_f = W_f \cdot W_g \cdot C_p (T_g - T_u) \text{ (kkal/kg)} \dots \dots \dots (2.25)$$

Dimana ;

$$W_f = \text{pemakaian bahan bakar (kg)}$$

W_g = berat gas asap kering (kg/kg_{bb})

C_p = panas jenis gas asap (kkal/kgas asap⁰C)

T_g = temperatur gas asap (⁰C)

T_u = temperatur ketel (⁰C)

2.6.1 Kerugian Gas Asap Basah

Kerugian ini merupakan kerugian panas yang terbawa oleh gas asap bekas dan terbang ke atmosfer melalui cerobong, yang disebut gas asap basah yang merupakan uap air. Apabila bahan bakar yang dipakai mengandung air, maka untuk setiap kilogram air yang terkandung dalam bahan bakar diperlukan sejumlah panas untuk mengubahnya menjadi uap dan keluar bersama gas bekas cerobong.

Panas yang dikandung uap air dapat terdiri dari :

- 1). Panas *Sensible*
- 2). Panas *Laten*
- 3). *Super Heat*

Yang besarnya tergantung pada tekanan dan temperature keluar airheater. Perlu diingat bahwa besarnya panas ini sama sekali tidak tergantung pada berapapun tingginya temperatur dalam dapur ketel, melainkan hanya tergantung pada temperatur awal ketika masuk ketel dan temperature akhir ketika meninggalkan air heater. Sumber air kedua adalah sebagai produk dari reaksi pembakaran hidrogen. Yaitu air yang terbentuk dari proses pembakaran hidrogen

adalah Sembilan kali kadar hidrogen dalam satuan berat. Kehilangan panas akibat adanya air dalam bahan bakar dihitung dengan persamaan

$$Q_{\text{moisture}} = W_m (H_{\text{sup}} - h_b) \dots \dots \dots (2.26)$$

$$= W_m [h \cdot hf + L \cdot hfg + C_p \cdot (t_f - t_{\text{sat}}) - h_b]$$

$$= W_m [(639,1) + C_p (t_f - 100) - h_b] \quad (\text{kkal/kg})$$

Pada ; $P = 1,033 \text{ (kg/cm}^2 = 1 \text{ atm)}$

$h = 100,1 \text{ (kkal/kg)}$

$L = 539 \text{ (kkal/kg)}$

$t_{\text{sat}} = 100^{\circ}\text{C}$

dimana ;

W_m = kandungan air dalam bahan bakar (kg)

C_p = panas jenis rata - rata air dalam gas asap

t_f = temperatur gas asap kering

t_{sat} = temperatur ruang ketel

h_b = panas total sensible pada ruang bakar

2.6.2 Kerugian Panas Akibat bahan bakar Hidrogen (Q_{H_2})

Waktu terjadi proses pembakaran hidrogen, reaksi pembakaran adalah air (H_2O) yang segera menguap dan mendapatkan pemanas lanjut. Berat air (H_2O) yang terbentuk adalah sembilan kali berat hidrogen dalam bahan bakar, jadi $W(H_2O) = 9 H_2$. Seperti halnya juga dengan moisture maka air yang terbentuk akan segera menguap di bawah kondisi saturasi, yaitu :

$P_{\text{sat}} = 1 \text{ atm}$

$t_{\text{sat}} = 100^{\circ}\text{C}$

$$h_{\text{sat}} = 640 \text{ kkal/kg}$$

Dengan unsur - unsur gas asap lainnya, lalu mengalami perpindahan panas dan meninggalkan ketel di bawah kondisi cerobong asap, yaitu :

$$\text{Tekanan (P)} = 1 \text{ atm}$$

$$\text{Temperatur (t}_g\text{)} = \text{temperatur gas asap.}$$

Pada saat inilah dianggap terjadi kerugian panas, sebesar :

$$QH_2 = 9H_2 [639,1 + C_p \cdot (t_g - 100) - t_u] \text{ (kkal/kg)}$$

2.6.3 Kerugian Panas Karena Abu Masih Mengandung Panas (Q_{at})

Kerugian ini terjadi akibat abu dan terak masih mengandung panas yang masih dapat dipergunakan.



Gambar 2.5.4 Sisa Pembakaran/terak

Dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_{\text{at}} = W_{\text{at}} \cdot C_{\text{at}} (t_{\text{at}} - t_u) \text{ (kkal/kg}_{\text{bb}})$$

Dimana ;

$$W_{\text{at}} = \text{berat abu dan terak (kg/kg}_{\text{bb}})$$

$$C_{\text{at}} = \text{panas jenis (kkal/kg}^{\circ}\text{C)}$$

$$W_{\text{at}} = \text{berat abu dan terak (kg/kg}_{\text{bb}})$$

$$C_{\text{at}} = \text{panas jenis (kkal/kg}^{\circ}\text{C)}$$

T_{at} = temperatur udara dalam ($^{\circ}\text{C}$)

T_u = temperature udara luar ($^{\circ}\text{C}$)

2.6.4 Kerugian Panas Akibat Radiasi (Q_{rad})

Pada penulisan ini diasumsikan terjadi pembakaran sempurna, diakibatkan karena keterbatasan alat dalam melaksanakan analisa orsat, maka ada beberapa kerugian yang diabaikan, kerugian - kerugian panas yang tidak dihitung dalam penulisan ini adalah :

- 1). kerugian uap hidro carbon tak terbakar.
- 2). kerugian akibat kombinasi karbon dengan air menghasilkan hidrogen.
- 3). kerugian akibat pembakaran yang tidak sempurna.
- 4). kerugian panas akibat karbon tidak terbakar dalam abu.
- 5). kerugian karena kandungan air dalam udara pembakaran.

2.7 Neraca Kalor

Neraca kalor adalah perimbangan antara “energi masuk” dengan “energi berguna” dan “kehilangan energi” . Sebagai energi masuk atau suplai energi adalah jumlah energi hasil pembakaran bahan bakar.

Jadi suplai energi :

$$Q_{in} = W_f \times (\text{LHV}) \text{ (kkal/kg)} \dots\dots\dots(2.27)$$

Atau

$$Q_{in} = (\text{LHV}) \text{ (kkal/kg}_{bb}) \dots\dots\dots(2.28)$$

“Energi berguna” adalah energi yang diserap oleh air sampai terbentuk uap dalam ketel, jadi :

$$Q_{out} = W_e (H_{sat} - H_a) \text{ (kkal/kg)}$$

$$Q_{out} = W_e (H_{sat} - H_a) \text{ (kkal/kg}_{bb})$$

$$W_e = \frac{W_s}{W_f} \quad (\text{kkal/kg}_{\text{bb}}) \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana ;

H_{sat} = Enthalpi uap saturasi (kkal/kg).

H_a = Enthalpi air mula - mula (kkal/kg).

Kehilangan energi panas adalah semua kehilangan panas yang disebabkan oleh kondisi pembakaran dan peralatan ketel. Proses pembakaran dalam ketel dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi. Diagram ini 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. Neraca panas merupakan keseimbangan energi yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan boiler dalam bentuk yang berbeda.

Tabel 2.2. Neraca Panas (kalor)

| Suplai panas Kkal/kg | Kkal/kg | % | Distribusi panas | Kkal/kg | % |
|--|---------|-----|---|---------|---|
| Panas pembakaran (Q_{in}) = LHV | - | 100 | - Panas berguna (Q_{ef}) - Kerugian gas asap kering (Q_g) - Kerugian gas asap basah (Q_{moisture}) - Kerugian panas akibat bahan bakar hidrogen(QH_2). - Kerugian panas akibat abu masih mengandung panas (Q_{at}) - Kerugian panas oleh radiasi (Q_{rad}) - dan lain - lain. | - | - |

2.8 Daya Guna (efisiensi) Ketel

Daya guna (efisiensi) ketel adalah perbandingan antara konsumsi panas dengan suplai panas.

Jadi ;

$$\eta_k = \frac{Q_{e_f}}{Q_{i_n}} \times 100\%$$

2.9. Volume Ruang Bakar

Ruang bakar adalah suatu ruangan bagian dari boiler dimana terjadi proses pembakaran atau sebagai tempat mengkonversikan energi kimia bahan bakar menjadi energi panas.

Untuk menentukan volume ruang bakar digunakan persamaan berikut :

$$V_f = \frac{W_f \cdot LHV \cdot \eta_f}{hg_f} \quad (m^3)$$

Ket ;

V_f = Volume ruang bakar (m^3)

W_f = jumlah bahan bakar yang digunakan (kg_{bb}/jam)

LHV = nilai kalor bawah bahan bakar ($kkal/kg_{bb}$)

η_f = efisiensi ruang bakar (0,90–0,97)

H_{gf} = Laju panas diserap dapur untuk bahan bakar padat.

= (149.000 – 199.995) $kkal/jam$