

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Ketel Uap

Ketel uap adalah suatu alat yang berfungsi memproduksi uap dengan jalan merubah air menjadi uap. Perubahan air menjadi uap didalam ketel uap ini adalah dengan jalan memanaskan air hingga terjadi uap yang diinginkan, hal itu dapat terjadi karena adanya perpindahan panas dari gas asap sebagai pemanas dan air yang dipanaskan. Uap yang dihasilkan oleh ketel dapat berbentuk uap jenuh (*saturated steam*) maupun uap yang dipanaskan lanjut (*superheated steam*).

Pengertian uap jenuh atau uap basah adalah uap yang masih mengandung air didalamnya dimana kadar air yang terkandung dalam uap tersebut antara 0 % sampai dengan 100 %, sedangkan uap jenuh yang dipanaskan lanjut hingga tidak mengandung air didalamnya biasa disebut uap kering.

Pada penelitian ini penulis akan membahas salah satu jenis ketel pipa air saja yaitu bermerk *Sunrod*. Ketel *Sunrod* ada berbagai macam type yaitu type asli *Sunrod CP* yang dilengkapi oleh sebuah pembakaran berbentuk silinder yang terletak pada dasarnya yang kering dengan satu pipa berdiameter lebar. Selain type tersebut diatas juga ada *type CPH* yang mempunyai pipa penghisap, ketel type ini dirancang untuk berbagai kapasitas dari 700 kg/hr – 35000 kg/hr dan dengan tekanan sampai 18 bar. Dan type CPH lah yang akan penulis bahas pada penelitian ini yaitu Ketel *Sunrod type CPH 200*.

Pada ketel jenis ini air yang akan diubah menjadi uap mengalir melalui pipa, dan pemanasan airnya dilakukan oleh gas-gas hasil pembakaran yang berada disekitar pipa tersebut.

Ketel ini mempunyai beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan ketel pipa api.:

1. Sanggup bekerja dengan tekanan tinggi.
2. Berat ketel yang relatif ringan dibandingkan dengan kapasitas ketel.
3. Dapat dioperasikan dengan cepat, jadi dalam waktu singkat dapat memproduksi uap.

Sedangkan kekurangan ketel jenis pipa air ini yaitu :

1. Air pengisian harus benar-benar bersih, agar tidak terjadi kerak, endapan atau korosi didalam ketel yang dapat menyebabkan kerusakan pada ketel dan menurunkan kualitas uap yang dihasilkan.
2. Membutuhkan pemakaian pengatur pengisian otomatis dan pengawasan yang ketat selama ketel berjalan.
3. Biaya investasi dan pemeliharaan cukup tinggi.

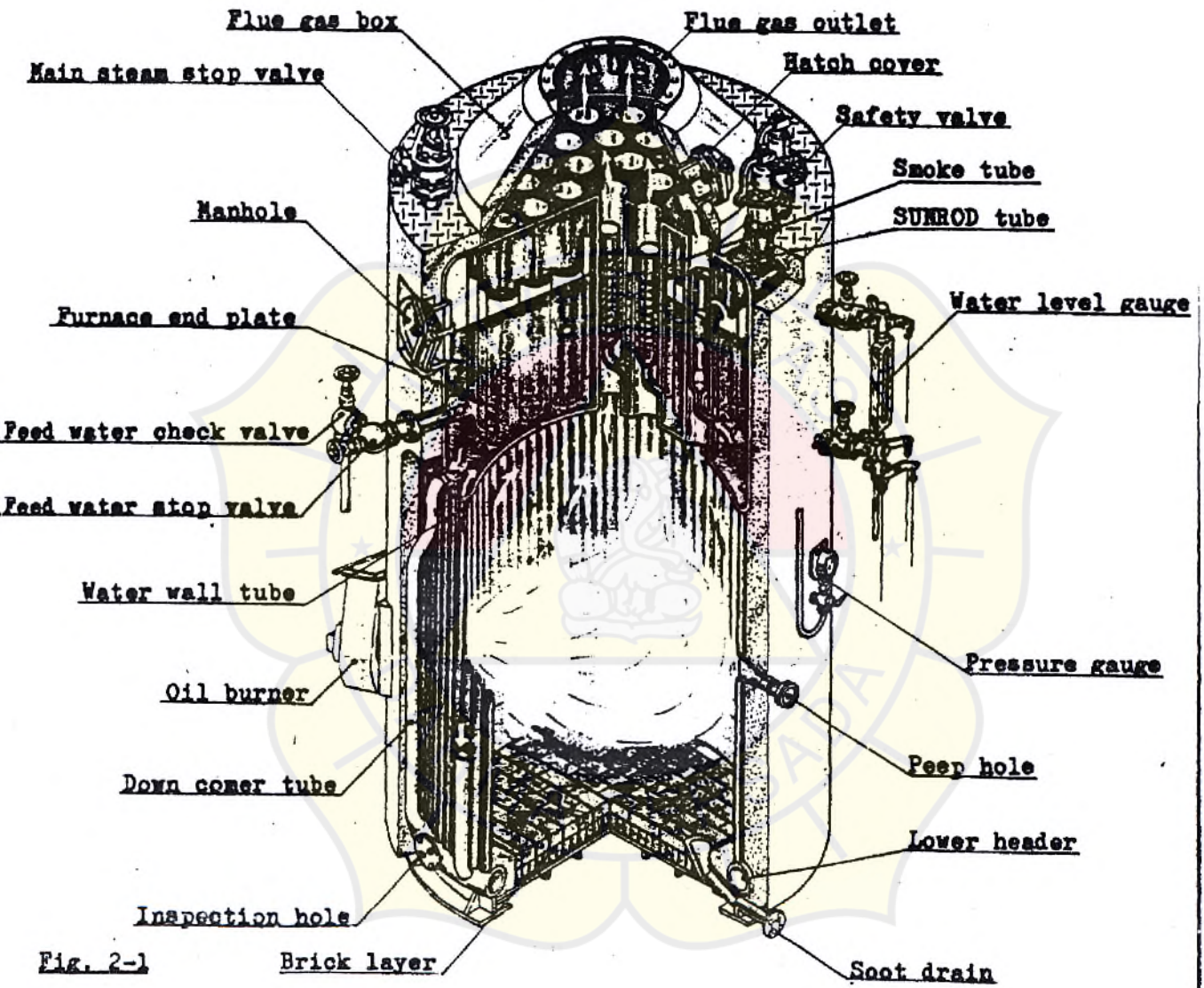


Fig. 2-1

2.2 Bagian-bagian Utama Ketel Pipa Air Ini

Bagian-bagian utama harus ada didalam ketel uap karena fungsinya yang sangat penting dan memiliki pengaruh yang besar terhadap proses pembentukan uap air.

2.2.1 Steam Drum (Drum Bagian Atas)

Steam drum dapat disebut juga *main drum* atau drum utama yang letaknya pada bagian puncak dari ketel pipa air, pada bagian ini terdapat uap jenuh yang berasal dari pipa-pipa *riser*.

Main drum ini juga berfungsi sebagai pendistribusian air ke pipa *down comer* dan sebagai tempat keluarnya uap jenuh untuk proses selanjutnya. Dan juga berfungsi sebagai tempat pembuangan partikel-partikel padat yang terlarut (*dissolve solid*) pada air umpan yang secara kontinu dibuang. (*blow down*).

2.2.2 Riser

Bagian ini terdiri dari susunan pipa-pipa yang membentuk dinding ruang bakar, dimana didalam pipa-pipa ini terjadi perubahan fase air menjadi uap akibat pemanasan yang diserap dari pembakaran bahan bakar di ruang bakar. *Riser* ini dilapisi oleh *insulation* yang mencegah aliran panas secara radiasi

2.2.3 Down Comer

Adalah susunan beberapa buah pipa yang berukuran besar atau terdiri dari beberapa pipa-pipa kecil yang menghubungkan *steam drum* dan *water drum*.

Fungsi utama *down comer* ini adalah menurunkan air yang ada didalam *steam drum* sambil mendesak campuran air dan uap dalam *riser*

Konstruksi dari *down comer* ini ada dua jenis yang pertama adalah pipa *down comer* ini mendapat pemanasan dari gas asap dan yang kedua tidak mendapat pemanasan dari gas asap, adapun yang pertama disebut juga dengan *ekonomiser*

2.2.4 Water Drum

Water drum ini terletak pada bagian bawah dari ketel uap yang berfungsi sebagai pengumpul air dari *down comer* dan mendistribusikannya kedalam pipa-pipa *riser*.

Tidak semua ketel uap menggunakan *water drum*, ada sebagian ketel yang menggunakan *header* bawah yang fungsinya sama dengan *water drum*. Baik *water drum* maupun *header* bawah terisi penuh oleh air jenuh.

2.2.5 Burner

Bahan bakar pada ketel tidak langsung dimasukkan begitu saja kedalam ruang bakar (*furnace*), melainkan dimasukkan dahulu kedalam alat yang dinamakan *burner*. Alat ini banyak digunakan sebagai alat pemanas pada ketel-ketel mengingat cara pengoperasiannya yang mudah dan kestabilan dari kontinuitas panas yang dihantarkan.

Adapun fungsi dari *burner* antara lain :

1. Menyemburkan bahan bakar keruang baker secara kontinyu.
2. Untuk mencampur bahan bakar dan udara pembakaran.
3. Memberikan penyalan yang kontinyu.

Burner yang digunakan pada ketel ini adalah jenis *air automizing burner*. Udara yang dialirkan dengan tekanan di sekeliling saluran bahan bakar akan tercampur dengan udara pembakaran pada ruangan bagian ujung dari *burner*. Bahan

bakar disemprotkan melalui *nozzle* dan dibantu dengan adanya *plug* yang berfungsi meratakan atau menturbulensikan dari atom-atom bahan bakar yang dicampur dengan udara pembakaran.

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan mengenai *burner* yang diantaranya adalah :

- *Beban ruang bakar*

Ruang bakar merupakan bagian utama dari ketel uap. Dimana dinding ruang bakar tersebut tersusun dari sekumpulan pipa-pipa riser tempat terjadinya perubahan dari fase air menjadi uap. Selain *riser*, dinding ruang bakar tersebut dilapisi oleh batu tahan api yang berfungsi sebagai isolasi sehingga tidak membahayakan operator mesin dan juga mengurangi kerugian radiasi kalor.

Di dalam ruang bakar ini terjadi perpindahan kalor dari sumber panas (hasil pembakaran bahan bakar) terhadap bidang pemanas (*heating surface*) secara pancaran (radiasi), konveksi dan konduksi. Dan yang paling penting adalah nyala api yang berasal dari burner tidak boleh menyentuh dinding *riser* dihadapannya karena dapat menimbulkan konsentrasi panas pada pipa *riser* sehingga pipa tersebut akan rusak atau pecah.

Beban ruang bakar ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Q_{RB} = \frac{LHV \times B'}{V_{RB}} \quad (\text{kkal} / \text{m}^3 \text{ jam}) \dots \dots \dots (2 - 1)$$

Dimana :

Q_{RB} = beban ruang bakar (kkal / m³ jam)

LHV = nilai pembakaran bawah (kkal / kg bb)

B' = bahan bakar efektif yang terpakai (kg .bb./ jam)

V_{RB} = volume ruang bakar (m^3)

- *Derajat kehitaman ruang bakar* adalah harga dari kehitaman (*emisifitas*) dari dinding ruang bakar yang terdiri dari pipa-pipa air, yang dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$A_2' = A_2 \left\{ - (1 - do/t)^2 \cdot \epsilon^2 \right\} \dots\dots\dots (2 - 2)$$

Dimana :

A_2' = derajat kehitaman pipa rata-rata

A_2 = derajat kehitaman tabir pipa air (= 1)

ϵ = factor yang tergantung pada harga do

do = diameter pipa air luar (mm)

t = pitch pipa tabir

- *Derajat kehitaman badan api* yang merupakan besaran yang menyatakan berapa besar energi yang dapat diserap oleh benda tersebut dari benda lain yang memancarkan radiasi kepadanya.

Derajat kehitaman badan api tergantung pada kaar gas-gas yang dapat meradiasikan panas yaitu gas H_2O dan gas CO_2 . Sedangkan ruang bakar dianggap mempunyai tekanan yang sama dengan tekana udara luar yaitu 1 atmosfer dan selanjutnya diperoleh tekanan parsial gas H_2O dan gas CO_2 .

Untuk dapat mencari derajat kehitaman badan api diperoleh dari hubungan sebagai berikut :

$$A_1' = \frac{\sum F_r A_1}{\sum F_r} \dots\dots\dots (2 - 3)$$

Dimana :

A_1' = derajat kehitaman badan api rata-rata

F_r = luas permukaan badan api (m^2)

A_1 = derajat kehitaman badan api
= $A_G + (1 - A_G) \cdot A_F$ (2-4)

A_G = derajat kehitaman gas-gas asap
= $A_{CO} + A_{H_2O}$(2-5)

A_F = derajat kehitaman nyala api
= $\frac{0,027 \cdot Q_{RB} R_{eg}}{10^5}$ (2-6)

- Temperatur di ruang bakar, yang pada umumnya berada pada batas 900 – 1200 °C

Jumlah kalor yang dipancarkan di ruang bakar adalah selisih kalor efektif gas asap pada temperatur teoritis dengan temperatur akhir. Selisih kalor tersebut dinyatakan dengan rumus:

$$Q = G' \cdot (i_{th} - C_{ga} \cdot T_E) \dots \dots \dots (2-7)$$

Dimana :

Q = selisih kalor efektif gas asap (kkal / jam)

G' = jumlah gas asap yang dihasilkan (kg.gas.jam)

i_{th} = enthalpi gas asap (kkal/nm³)

C_{ga} = kalor jenis gas asp rata-rata (kkal/kg⁰C)

T_E = temperayur akhir furnace (⁰C)

Sedangkan jumlah kalor yang dipancarkan adalah sebagai berikut :

$$Q = \beta \cdot C \cdot Fr \cdot \left[\frac{T_E + 273}{100} \right]^4 \quad (\text{kkal/jam}) \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana :

Q = jumlah kalor yang dipancarkan (kkal/jam)

β = faktor kesamaan dari penembusan panas

C = konstanta pancaran (kkal/m³.⁰K⁴)

T_E = temperatur akhir *furnace* (ruang bakar) (⁰C)

Fr = luas permukaan badan api (m²)

Diperoleh bahwa temperatur akhir *furnace* merupakan fungsi dari :

$$\frac{G'}{Fr.C} \dots \dots \dots (2-9)$$

dengan parameter enthalpi gas asap i_{th} :

$$T_E = \frac{f.G'.i_{th}}{Fr.C} \dots \dots \dots (2-10)$$

Dimana :

G' = total gas asap yang terbentuk tiap jam (kg.gas/jam)

Fr = luas permukaan badan api (m²)

C = konstanta pancaran (kkal/m².⁰K⁴)

$$= \frac{5,21}{\frac{1}{A_1} + \frac{Fr}{F_{RB}} \left[\frac{1}{A_2} - 1 \right]} \dots \dots \dots (2-11)$$

dimana :

A₁' = derajat kehitaman badan api rata-rata

F_{RB} = luas permukaan ruang bakar (m²)

$Fr =$ luas permukaan badan api (m^2)

$A_2' =$ derajat kehitaman ruang bakar rata-rata

Maka :

$$C = \frac{5,21}{\frac{1}{0,663} + \frac{80,6}{16,358} \left[\frac{1}{0,84} - 1 \right]}$$

$$= 2,129 \text{ (kkal /m}^{20}K^4 \text{)}$$

sedangkan enthalpi gas adalah :

$$i_{th} = \frac{LHV + C_p \cdot T_{ud} \cdot U_t'}{G} \text{ (kkal /nm}^3 \text{)} \dots \dots \dots (2-12)$$

diamana:

LHV = nilai pembakaran bawah (kkal /kg.bb)

$C_p =$ kalor spesifik udara rata-rata = 0,219 kkal / kg °C

$T_{ud} =$ temperatur udara luar = 30°C

$$U_t' = U_t \cdot \frac{(T_{ud} + 273)}{273} \cdot \gamma_1 \text{ (kg/kg.bb) } \dots \dots \dots (2-13)$$

Dimana :

$U_t =$ total udara pembakaran yang diperlukan (kg.ud/kg.bb)

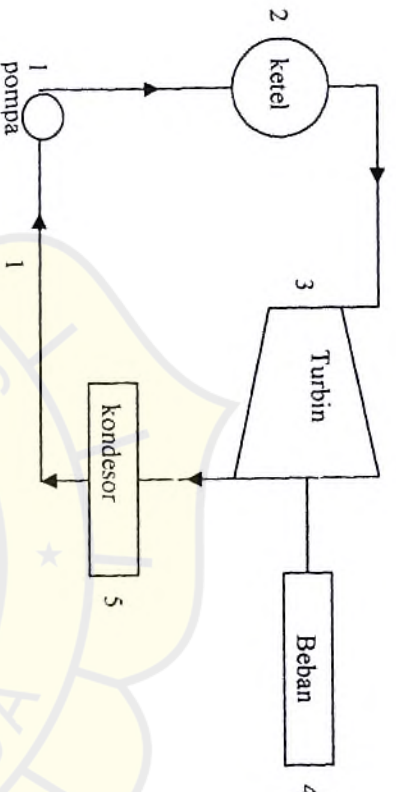
$\gamma_1 =$ density udara ; 1,127 kg / m³

$G =$ total gas asap yang terbentuk (kg.gas / kg.bb)

2.3 Siklus Termodinamika

Secara garis besar, siklus tenaga uap terdiri dari proses penguapan di ketel, proses ekspansi uap turbin, proses kondensasi pada kondensor dan proses

pemompaan air kondensat oleh pompa air pengisi. Dalam bentuk gambar, siklus instalasi uap dapat dilihat pada gambar 2.2.



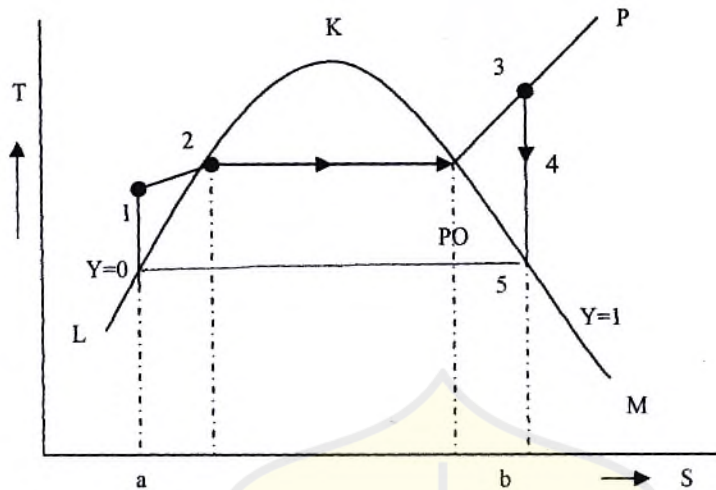
Gambar 2.2 Siklus Instalasi Uap

Keterangan Gambar 2.2

1. pompa air pengisi ketel (2)
2. Ketel uap
3. Turbin uap
4. Beban berupa generator listrik
5. Kondensor

Air dihisap oleh pompa pengisi ketel (2), air dipompa masuk kedalam ketel pada tekanan p bar, air didalam ketel dipanaskan hingga menjadi uap, uap yang dipanaskan lanjut menuju keturbin uap untuk menggerakkan kopel untuk ke beban, kemudian sisa uap tersebut atau uap bekas masuk kekondensor untuk diembunkan kembali, embun air yang terkumpul dipompa kembali masuk keketel.

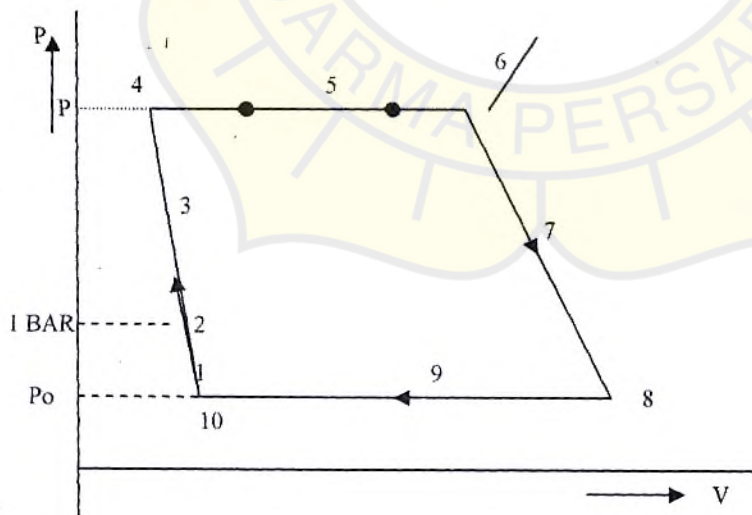
Juga dapat dilihat diagram T – S diagram P – V siklus Carnot untuk instalasi tenaga uap untuk kepentingan penelitian guna mendapatkan harga efisiensi thermal.



Gambar 2.3 Diagram T - S

Keterangan Gambar 2.3 Diagram T - S

1. Untuk no 1 s/d 5 sama dengan keterangan pada gambar 2.2
2. K = titik kritis
3. K - L = Garis air jenuh = *liquid line*; jumlah uap = 0 %
4. K - M = Garis uap jenuh = *saturation line*; jumlah uap = 100%
5. Antara K-L dan K-M terdapat campuran air dan uap pada berbagai kadar uap.



Gambar 2.4 Diagram P - V

Keterangan Gambar 2.4 Diagram P - V

1. Untuk no. 1 s/d 10 sama dengan keterangan pada gambar 2.2
2. Jumlah energi panas untuk membuat 1 kg uap yang dipanaskan lanjut pada p bar dan t_u °C dinyatakan dengan luas 1-2-5-a-b sedangkan jumlah panas yang akan dilepaskan oleh 1 kg uap didalam kondensor dinyatakan dengan luas a-1-5-b-a.

Siklus tenaga uap yang terjadi pada Ketel Uap Kapal Tanker MT PENDOPO / PERTAMINA 1020 dapat dijelaskan seperti dibawah ini :

Air pengisi ketel mula-mula dipanaskan terlebih dahulu pada ekonomiser sampai mendekati titik didihnya, dengan sumber panas yang diambil dari gas bekas *main engine* sebelum dibuang kecerobong. Kemudian air tersebut dipompa ke ketel untuk diuapkan. Kondisi uap yang keluar dari ketel adalah uap jenuh (*saturated steam*) yang selanjutnya dimasukkan ke superheater, dimana ditambahkan panas lagi untuk mendapatkan uap lanjut (*superheater steam*). Kemudian uap lanjut tersebut dialirkan ke turbin.

Sepanjang lalunya pada turbin, sebagai uap diekstraksi untuk memanaskan air pengisi ketel pada *feed water heater*. Banyaknya titik ekstraksi disesuaikan dengan jumlah *feed water heater* yang digunakan, sekitar 70 sampai 75 % uap yang masuk turbin akan keluar sebagai *exshhaust* dan akan masuk ke kondensor.

Pada kondensor, uap diembunkan dengan cara memindahkan panas laten bekas pada air pendingin, dimana air pendingin ini dapat diambil dari laut. Dengan besarnya kapasitas aliran uap masuk dari turbin ke kondensor, maka tidak dapat dihindari kemungkinan adanya gas ikutan yang dapat mengembun misalnya O_2 , N_2

dan lain-lain. Gas tersebut dibuang dari kondensor agar tidak terakumulasi sehingga menaikkan tekanan kondensor.

Hot Well yang diletakkan dibawah kondensor akan menampung air kondensat hasil pengembunan dan selanjutnya dipompakan ketangki air pengisian ketel oleh pompa kondensat. Pompa air pengisian ketel sebagai penutup dari rangkaian siklus harus mempunyai tekanan lebih tinggi dari tekanan ketel.

2.4 Pembakaran

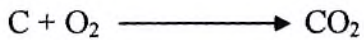
Pembakaran adalah suatu reaksi antara unsur-unsur bahan bakar dengan oksigen (O_2) yang dikenal dengan oksigen. Dalam pembakaran terjadi gas-gas hasil pembakaran, uap air, sisa-sisa pembakaran yang merupakan abu ataupun endapan – endapan. Dari pembakaran tersebut, ada yang dengan nilai pembakaran, yaitu jumlah kalor yang dikeluarkan oleh satu satuan berat atau satu satuan volume dari bahan bakar dalam reaksinya dengan oksigen. Bahan Bakar yang digunakan pada ketel uap jenis pipa air ini adalah minyak solar dan minyak residu. Minyak solar digunakan sebagai *start* sedang minyak residu sebagai bahan bakar utama setelah mesin berjalan. Komposisi dari bahan bakar jenis minyak residu adalah :

Unsur	Kadar
C	85,70 %
H ₂	13,2 %
O ₂	0,18 %
N ₂	0,17 %
S	3,07 %
H ₂ O	0,17 %

Tabel 2.1 Komposisi Bahan Bakar

Unsur-unsur tersebut dapat bereaksi dengan O_2 kecuali O, N dan Abu. Unsur N sendiri disebut inert gas. Namun N dan O dapat bereaksi pada temperatur tinggi . Secara praktis dalam perhitungan, udara mempunyai komposisi sebagai berikut:

a. Pembakaran unsur C menjadi CO_2 menurut persamaan :



b. Pembakaran unsur H menjadi H_2O menurut persamaan :



c. Pembakaran unsur S menjadi SO_2 menurut persamaan :



Dalam hal ini jumlah O_2 yang terdapat dalam bahan bakar merupakan kerugian karena secara tidak langsung O_2 mengambil sejumlah H_2 didalam bahan bakar tersebut.

Dimana :

1 bagian H_2 bereaksi dengan 8 bagian O_2

1 bagian O_2 bereaksi dengan $\frac{1}{8}$ bagian H_2

Jadi jumlah hidrogen yang tidak ikut bereaksi $H_2 - \frac{O_2}{8}$

Dari persamaan reaksi diatas dan nilai kalor masing-masing unsur dapat dibuat rumus pembakaran atas (*HHV*) dan pembakaran bawah (*LHV*) sebagai berikut:

1. Nilai Pembakaran Atas (*HHV*) adalah nilai pembakaran atau kalor yang dihasilkan pada pembakaran satu satuan berat bahan dimana uap air yang terjadi mengembun. Nilai tersebut dapat dicari dengan menggunakan rumus :

$$HHV = 8100 \frac{C}{100} + 34400 \frac{\left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right)}{100} + 2500 \frac{S}{100} \text{ (kkal / kg bb)} \dots \dots (2 - 14)$$

2. Nilai Pembakaran Bawah (*LHV*) adalah nilai pembakaran atau kalor yang dihasilkan pada pembakaran satu satuan berat bahan dimana uap air yang terjadi tidak mengembun. Nilai tersebut dapat dicari dengan menggunakan rumus :

$$LHV = 8100C + 34400 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 2500S - 600(M + 9X_H) \text{ (kkal / kg bb)} (2-15)$$

Selain nilai pembakaran atas dan bawah, ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pembakaran diantaranya adalah :

-Jumlah pembakaran bahan bakar, :

Kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap tiap jam dan kalor yang ditimbulkan pada proses pembakaran bahan bakar merupakan dua hal yang penting dalam menghitung bahan bakar yang dibutuhkan.

Kalor yang ditimbulkan pada proses pembakaran tidak seluruhnya dapat diberikan pada medium yang dipanaskan, tetapi hilang begitu saja melalui *sack* (cerobong) dan instalasi lainnya.

Kalor yang digunakan untuk menghasilkan uap perjam adalah :

$$Q_o = D (h_u - h_a) \text{ (kkal) } \dots\dots\dots(2-15)$$

Dimana : D = jumlah uap yang dihasilkan tiap jamnya = 16 ton uap / jam

h_u = enthalpi uap yang dihasilkan

h_a = enthalpi air yang dihasilkan

Kalor yang timbul pada proses pembakaran bahan bakar tiap jamnya adalah ;

$$Q_i = B' \cdot LHV \text{ (kkal / jam) } \dots\dots\dots(2-16)$$

Pada kesetimbangan kalor, adalah akan diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$Q_o = Q_i \cdot \eta_k \dots\dots\dots(2-17)$$

$$B = \frac{D \cdot (h_u - h_a)}{\eta_k \cdot LHV} \text{ (kg bb / jam) } \dots\dots\dots(2-18)$$

dimana : D = jumlah uap yang dihasilkan = 16 Ton uap panas lanjut / jam

h_u = enthalpi uap yang dihasilkan (kkal / kg)

h_a = enthalpi air yang dihasilkan (kkal / kg)

LHV = nilai pembakaran bawah fuel oil (kkal / kg bb)

η_k = efisiensi ketel

- Total bahan bakar efektif yang terbakar, dengan menggunakan rumus :

$$B' = (1 - \sigma_u) B \text{ (kg bb / jam) } \dots\dots\dots(2-19)$$

Dimana :

σ_u = kerugian karena adanya sebagian kecil bahan bakar yang tidak terbakar (untuk pembakaran bahan bakar minyak = 0,02)

- Jumlah udara pembakaran secara teoritis untuk membakar 1 kg bahan bakar digunakan rumus :

$$u_{og} = 11,496 \frac{C}{100} + 4,310 \frac{S}{100} + 34,483 \frac{\left(H - \frac{O}{8} \right)}{100} \quad (\text{ kg ud / kg bb }) \dots (2-20)$$

atau apabila disederhanakan menjadi :

$$u_{og} = \frac{100}{23,1} \times [2,67C + 8H - O + S] \quad (\text{ kg.ud / kg.bb}) \dots (2-21)$$

Pada prakteknya jumlah udara pembakaran yang dibutuhkan selalu dilebihkan yang tujuannya untuk menghindari agar tidak terjadi gas CO pada gas asap. Kelebihan udara (*excess air*) untuk jenis minyak : 8 ~ 15%

Untuk bahan bakar minyak kelebihan udara : 10 %, jadi udara aktual yang dibutuhkan, U :

$$U = (1 + E). U_{og} \dots (2-22)$$

dimana : E = angka udara berlebih (*excess air*)

U_{og} = udara pembakaran teoritis

Dalam rumusan diatas merupakan rumusan yang berlaku untuk udara kering. Sedangkan pada keadaan sebenarnya ikut serta terbawa sejumlah air yang memperkecil jumlah udara pembakaran yang dibutuhkan.

Sehingga total udara pembakaran yang dibutuhkan adalah :

$$U_t = f \times U \dots (2-23)$$

Dimana : U = udara praktis yang dibutuhkan

f = factor kelembaban udara pada $30^{\circ}\text{C} = 1,0350$

Berat gas asap yang terbentuk dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar adalah sama dengan jumlah berat udara yang dibutuhkan ditambah dengan berat bahan bakar yang berubah menjadi gas asap kecuali abunya.

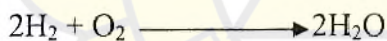
Ada dua macam gas asap yang dihasilkan :

1. Gas asap kering
2. Gas asap basah

1) Mencari *jumlah gas asap kering yang terbentuk* dalam 1 kg bahan bakar digunakan rumus :

$$G_1 = 12,496 \frac{C}{100} + 5,310 \frac{S}{100} + 26,483 \frac{\left(\frac{H}{8} - \frac{O}{8} \right)}{100} + 1,257 \frac{N}{100} \text{ (kg gas asap/kg bb)} \quad (2-24)$$

2) Mencari *jumlah gas asap basah yang terbentuk* dalam 1 kg bahan bakar digunakan rumus :



jadi, H_2O yang terbentuk : 9 kg H_2O

$$\text{volume H}_2\text{O yang terbentuk} : \frac{9}{0,804} = 11,2 \text{ Nm}^3 \text{H}_2\text{O}$$

Maka uap air yang terbentuk :

$$G_2 = \frac{9H}{100} + \frac{W}{100} \text{ (kg uap air / kg.bb)} \quad \text{atau}$$

$$G_2 = 11,2 \left[\frac{H}{100} + \frac{W}{100} \right] \text{ Nm}^3 \text{ uap air / kg.bb}$$

$$G_3 = G_1 + \frac{9H}{100} + \frac{W}{100} \quad (\text{kg gas asap / kg bb}) \dots\dots\dots(2-25)$$

- Total gas asap yang terbentuk dengan menggunakan rumus :

Karena pada proses pembakaran dilebihkan udara pembakaran sampai 10% dan dengan diadakannya factor koreksi (f), maka jumlah gas sesungguhnya yang terbentuk.

$$G = G_3 + \frac{10}{100} f \cdot U_{og} \quad (\text{kg gas asap / kg bb}) \dots\dots\dots(2-26)$$

Dimana :

f = Faktor pengaruh kelembaban udara

= 1,0350 pada temperatur 30⁰ C

U_{og} = jumlah udara teoritis yang dibutuhkan

2.5 Perpindahan Panas Pada Ketel Uap

Proses perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan temperature antara dua benda atau dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah. Besarnya bidang pemanas dibatasi oleh beban bidang pemanas yaitu kemampuan bidang pemanas menerima laju perpindahan panans persatuan luas bidang pemanas.

Jumlah kalor yang dikeluarkan atau dipancarkan dari pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan uap dengan kapaasitas 16 ton uap /jam dengan tekanan operasi 16 kg/cm² didapat persamaan :

$$Q_i = LHV \times B' \dots\dots\dots(2-27)$$

Dimana :

LHV = nilai pembakaran bawah (kkal /kg .bb)

B' = total bahan bakar efektif yang terpakai (kg bb / jam)

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara, yang berupa api (yang menyala) dan gas asap (yang tidak menyala) dipindahkan kepada air, uap ataupun udara melalui bidang yang dipanaskan atau *heating surface*, pada suatu instalasi ketel uap dengan tiga cara, yaitu :

2.5.1 Perpindahan Panas Secara Pancaran (Radiasi)

Yaitu suatu perpindahan panas antara suatu benda dengan benda yang lain dengan jalan melalui gelombang elektro-magnetis tanpa tergantung kepada ada atau tidaknya media atau zat diantara benda yang menerima pancaran panas tersebut. Perpindahan panas terjadi pada ketel uap antara dua fluida yang mengalir dengan dibatasi pipa-pipa air dan dinding ketel. Di dalam ruang bakar proses tersebut terjadi secara pancara atau radiasi dari nyala api dan gas panas pada dinding pipa-pipa air dan dinding ketel. Kalor yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar diserap oleh pipa-pipa air secara radiasi untuk mengubah air (*feed water*) menjadi uap (saturated steam) dan juga diserap oleh dinding ketel yang berada dihadapan nyala api.

Untuk mencari jumlah kalor yang diserap secara radiasi digunakan rumus :

$$Q_R = A_2 F_{\text{eff}} \left[\left(\frac{T_E + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{ kkal / jam }) \dots \dots \dots (2-28)$$

Dimana :

Q_R = jumlah kalor yang diserap secara radiasi (kkal / jam)

A_2 = derajat kehitaman ruang bakar

F_{eff} = luas efektif dari bidang pemanas (m^2)

T_E = temperatur furnace ($^{\circ}\text{C}$)

t_a = temperatur udara pembakaran ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.2 Perpindahan Panas Secara Aliran (Konveksi)

Yaitu perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cair ataupun gas). Molekul-molekul fluida tersebut dalam gerakannya melayang kesana-kemari membawa sejumlah panas masing-masing q Joule. Pada saat molekul fluida tersebut menyentuh dinding ketel maka panasnya dibagikan sebagian, yaitu q_1 Joule kepada dinding ketel, selebihnya yaitu $q_2 = q - q_1$, Joule dibawa pergi. Bila molekul yang gerakannya melayang karena perbedaan temperatur didalam fluida maka perpindahan panas disebut konveksi bebas atau konveksi alamiah. Bila gerakan molekul-molekul akibat dari kekuatan mekanis (karena pompa atau hembusan fan) maka perpindahan panasnya disebut konveksi paksa. Perpindahan panas terjadi pada ketel uap antara dua fluida yang mengalir dengan dibatasi pipa-pipa air dan dinding ketel.

$$Q_K = \alpha \cdot F_{\text{rb}} \cdot (T_{\text{api}} - T_{\text{dinding}}) \quad (\text{kkal / jam}) \dots\dots\dots(2-29)$$

Dimana :

Q_K = perpindahan panas secara konveksi (kkal / jam)

α = angka peralihan panas dari api ke dinding ketel (kkal / m^2 jam $^{\circ}\text{C}$)

F_{rb} = luas bidang pemanas dinding ketel (m^2)

T = temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.3 Perpindahan Panas Secara Perambatan (Konduksi)

Yaitu perpindahan panas dari suatu bagian padat ke bagian lain dari benda padat yang sama, atau dari benda padat yang satu ke benda padat yang lain karena terjadinya persinggungan fisik tanpa terjadinya perpindahan molekul-molekul dari benda padat itu sendiri. Perpindahan panas terjadi pada ketel uap antara dua fluida yang mengalir dengan dibatasi pipa-pipa air dan dinding ketel. Secara konduksi atau perambatan, kalor dari gas asap yang berasal dari pembakaran bahan bakar ketika menyentuh dinding ketel akan dirambatkan dari molekul-molekul dinding ketel yang berbatasan dengan gas asap menuju dinding ketel sebelah dalam berbatasan dengan udara luar. Untuk mencari nilai perpindahan panas secara konduksi dapat digunakan rumus :

$$Q_{\text{kon}} = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2}) \quad (\text{kkal / jam}) \dots\dots\dots (2-30)$$

Dimana :

Q_{kon} = perpindahan panas secara konduksi (kkal / jam)

λ = angka perambatan panas dalam dinding ketel (kkal / jam. m. $^{\circ}\text{C}$)

s = tebal dinding ketel (m)

F = luas dinding ketel yang merambatkan panas (m^2)

T_{d1} = temperatur dinding ketel sebelah luar ($^{\circ}\text{C}$)

T_{d2} = temperatur dinding ketel sebelah kanan ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.4 Perpindahan Panas Secara Konveksi dan Konduksi

Perpindahan panas di dalam ruang bakar secara konveksi dan konduksi terdiri dari proses-proses sebagai berikut :

- Panas dialihkan dari fluida (api atau gas asap) kepada benda padat yang berlapis-lapis (jelaga – batu isolasi – dinding ketel)
- Panas kemudian dirambatkan (konduksi) didalam benda padat tersebut.
- Panas lalu dialihkan dari benda padat (dinding ketel) ke fluida (udara)

Panas dari gas asap dipindahkan kepada udara melalui lapisan-lapisan :
jelaga – batu isolasi – dinding besi.

Adapun tahap-tahap perpindahan panas adalah sebagai berikut :

Q_1 = panas yang diserahkan oleh gas asap kepada jelaga

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{ga} - T_{dl})$$

Q_2 = panas yang dirambatkan didalam jelaga

$$Q_2 = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{dl} - T_{d2})$$

Q_3 = panas yang dirambatkan di dalam batu isolasi (bricks)

$$Q_3 = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d2} - T_{d3})$$

Q_4 = panas yang dirambatkan pada dinding besi

$$Q_4 = \frac{\lambda}{s} \cdot F \cdot (T_{d3} - T_{d4})$$

Q_5 = panas yang diserahkan dari dinding ketel kepada udara

$$Q_5 = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d4} - T_{udara})$$

Bila keadaan setimbang tercapai (*steady state*) maka :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q$$

Sebab jika tidak demikian, maka berarti ada panas yang tertinggal. Yang berarti disuatu tempat temperaturnya akan terus menerus meningkat.

Kelima buah persamaan tersebut dapat ditulis menjadi :

$$Q_1 = Q = \alpha_1 \cdot F \cdot (T_{ga} - T_{d1}) \longrightarrow T_{ga} - T_{d1} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{Q}{F}$$

$$Q_2 = Q = \frac{\lambda_1}{s_1} \cdot F \cdot (T_{d1} - T_{d2}) \longrightarrow T_{d1} - T_{d2} = \frac{s_1}{\lambda_1} \frac{Q}{F}$$

$$Q_3 = Q = \frac{\lambda_2}{s_2} \cdot F \cdot (T_{d2} - T_{d3}) \longrightarrow T_{d2} - T_{d3} = \frac{s_2}{\lambda_2} \frac{Q}{F}$$

$$Q_4 = Q = \frac{\lambda_3}{s_3} \cdot F \cdot (T_{d3} - T_{d4}) \longrightarrow T_{d3} - T_{d4} = \frac{s_3}{\lambda_3} \frac{Q}{F}$$

$$Q_5 = Q = \alpha_2 \cdot F \cdot (T_{d4} - T_{udara}) \longrightarrow T_{d4} - T_{udara} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{Q}{F}$$

Dengan menjumlahkan kelima persamaan tersebut akan didapat persamaan sebagai berikut :

$$T_{ga} - T_{ud} = \frac{Q}{F} \cdot F \cdot \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right] \dots\dots\dots (2-31)$$

Dengan mengganti seluruh faktor didalam kurung dengan $1/k_k$ maka persamaan tersebut menjadi :

$$Q = k_k \cdot F \cdot (T_{ga} - T_{udara}) \dots\dots\dots (2-32)$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa temperatur gas asap ataupun temperatur udara tidak tergantung kepada tingginya temperatur jelaga, temperatur batu isolasi dan temperatur dinding besi.

Untuk perhitungan perpindahan panas ini, diketahui :

- Temperatur gas asap (T_{ga}) = 812,15 °C
- Temperatur udara luar (T_{ud}) = 30°C

- Luas permukaan ruang bakar (F) = 80,56 m²
- Tebal jelaga (s₁) = 2 mm (asumsi)
- Tebal isolasi (s₂) = 5 cm
- Tebal dinding besi (s₃) = 2 cm
- Konduktivitas thermal jelaga (λ₁) adalah = 0,072 Btu/hr.ft.^oF atau 0,107 kkal/jam.m.^oC. (lihat lampiran F)
- Konduktivitas thermal batu isolasi, λ₂ = 0,050 Btu/hr.ft.^oC atau 0,074 kkal/jam.m.^oC (lihat lampiran G)
- Konduktivitas thermal dinding besi, λ₃ = 26 Btu/ hr.ft. ^oF atau 36,8 kkal /jam .m.^oC.
- Koefisien perpindahan panas dari gas asap ke jelaga (α₁) = 798,1 kkal/m².jam^oC. (lihat lampiran H)
- Koefisien perpindahan panas dari dinding ketel ke udara luar (α₂) = 230 kkal/m².jam ^oC. (lihat lampiran I)

Maka :

$$\frac{1}{k_k} = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right]$$

$$\frac{1}{k_k} = \left[\frac{1}{798,1} + \frac{0,002}{0,107} + \frac{0,05}{0,074} + \frac{0,02}{38,68} + \frac{1}{230} \right]$$

$$= 0,342 \text{ kkal /jam.m}^2.\text{o}^\circ\text{C}$$

$$\text{jadi} = 2,92 \text{ kkal /jam.m}^2.\text{o}^\circ\text{C}$$

Maka perpindahan panas total yang terjadi didalam ruang bakar adalah :

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{RI}} + Q_{\text{RII}} + Q_k \dots\dots\dots(2-33)$$

Untuk menghitung nilai efisiensi penyerapan panas yang terjadi didalam ruang bakar dilakukan dengan menjumlahkan kalor yang diserap di dalam ruang bakar secara radiasi, dan konveksi dan besaran ini lalu dibagi dengan jumlah kalor yang dikeluarkan dari hasil pembakaran bahan bakar.

Jadi efisiensi perpindahan panas yang diserap didalam ruang bakar adalah :

$$\eta_{rb} = \frac{Q_{tot}}{Q_i} \times 100\% \dots\dots\dots(2-34)$$

2.5.5 Temperatur Gas Asap Meninggalkan Ruang Bakar

Temperatur gas asap meninggalkan ruang bakar didapat dari persmaan :

$$Q_R = G' \cdot (T_1 \cdot Cp_1 - T_2 \cdot Cp_2) \dots\dots\dots (2-35)$$

Dimana :

Q_R = jumlah kalor yang diserap secara radiasi

G' = massa aliran gas asap/jam

Cp_1 = koefisien panas jenis rata-rata gas asap diruang bakar

T_1 = temperature awal furnace

T_2 = temperatur gas asap furnace meninggalkan ruang bakar.

Cp_2 = panas jenis gas asp ketika meninggalkan ruang bakar.

Sedang T_1 di dapat dari persamaan :

$$T_1 = \frac{LHV + U_t \cdot Cp \cdot T_{ud}}{G \cdot C_{pg}} \dots\dots\dots(2-36)$$

Dimana :

L_w = kebutuhan udar sesungguhnya.

Cp = koefisien panas jenis udara sesungguhnya.

T_{ud} = temperatur udara luar

G = total berat gas asap

C_{pg} = koefisien panas jenis gas asap.

2.6 Neraca Kalor

Panas yang dihisap oleh ketel uap dari bahan bakar sebagian besar dipakai untuk memanaskan air sehingga menjadi uap. Tapi sebagian dari panas yang ada tersebut tidak dipergunakan dengan baik, panas ini yang disebut sebagian *kerugian ketel*. Adapun kerugian yang dialami ketel, antara lain :

1. Kerugian panas melalui cerobong

Kerugian hilangnya panas ini disebabkan karena gas asap yang melewati cerobong mempunyai temperatur yang tinggi. Kerugian cerobong ini merupakan kerugian terbesar.

Besarnya kerugian cerobong dapat ditentukan dengan hubungan :

$$L_a = G \cdot (T_g - T_u) \cdot C_{pg} \quad (\text{kkal} / \text{kg}) \dots \dots \dots (2-37)$$

Dimana :

G = berat gas asap (kg gas asap / kg bb)

T_g = temperatur gas asap keluar ($^{\circ}\text{C}$)

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

C_{pg} = panas jenis gas asap kkal / kg ($^{\circ}\text{C}$).

2. Kerugian panas moisture dari bahan bakar

Kerugian karena adanya kandungan air didalam bahan bakar.

Besarnya kerugian ini dapat ditentukan dengan hubungan :

5. Kerugian akibat radiasi, yang diperkirakan 1%

$$L_R = 1\% \text{ HHV (kkal / kg) } \dots\dots\dots(2-41)$$

6. Selain menentukan kerugian-kerugian di atas, kalor yang dimasukan kembali kedalam ketel (heat credit) untuk proses pembakaran perlu juga diperhitungkan untuk mengetahui efisiensi ketel yang lebih tepat.

Adapun beberapa macam jenis *heat credit*, yaitu :

1. Panas yang terkandung di dalam bahan bakar

Merupakan panas yang dimasukan kembali ke ruang bakar melalui pemanasan bahan bakar tersebut :

$$q_f = C_{pf} \cdot (t_g - t_{ud}) \dots\dots\dots(2-42)$$

dimana : C_{pf} = panas jenis bahan bakar (kkal / kg. $^{\circ}$ C)

t_f = temperature bahan bakar yang dipanaskan ($^{\circ}$ C)

t_{ud} = temperatur udara luar ($^{\circ}$ C)

Pada tabel untuk $t_f = 90^{\circ}$ C

$$API = 22$$

Panas jenis residu , $C_{pf} = 0,478$ $^{\circ}$ C (lihat lampiran L)

2. Panas Udara Pembakar

Adalah udara yang dipanaskan melalui air heater untuk reaksi pembakaran.

$$q_{ud} = C_{pa} \cdot U_t \cdot (t_{in} - t_{ud}) \dots\dots\dots (2-43)$$

diamana : C_{pa} = panas jenis udara (kkal / kg)

t_{in} = temperatur udara setelah dipanaskan ($^{\circ}$ C)

Untuk temperatur udara keluar, $\Delta H = 35$ $^{\circ}$ C (98 $^{\circ}$ F) didapat,

$$C_{pa} = 0,239 \quad (\text{lihat lampiran M})$$

3. Panas dari moisture di udara pembakar

$$q_m = U_t \cdot W_{ma} \cdot C_{ps} \cdot (t_{in} - t_{ud}) \dots\dots\dots(2-44)$$

dimana : C_{ps} = panas jenis udara pada temperatur 35°C (0,449)

Maka total heat credit :

$$q = q_f + q_{ud} + q \dots\dots\dots(2-45)$$

Rumus untuk menentukan efisiensi ketel dengan metode tidak langsung:

$$\eta_k = \frac{[(HHV + q) - L]}{(HHV + q)} \dots\dots\dots(2-46)$$

dimana : L = jumlah kerugian-kerugian kalor

q = jumlah heat credit.

adapun kesalahan relatifnya adalah :

$$\Delta\eta = \frac{\eta_A - \eta_k}{\eta_k} \times 100\% \dots\dots\dots(3-25)$$

dimana : η_A = efisiensi yang telah ditentukan dari awal

η_k = efisiensi perhitungan