

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Boiler**

Salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik adalah Boiler (Steam Generator) atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama Turbin Uap. Energi panas diperoleh dengan jalan pembakaran bahan bakar di ruang bakar.

#### **2.2 Klasifikasi Boiler**

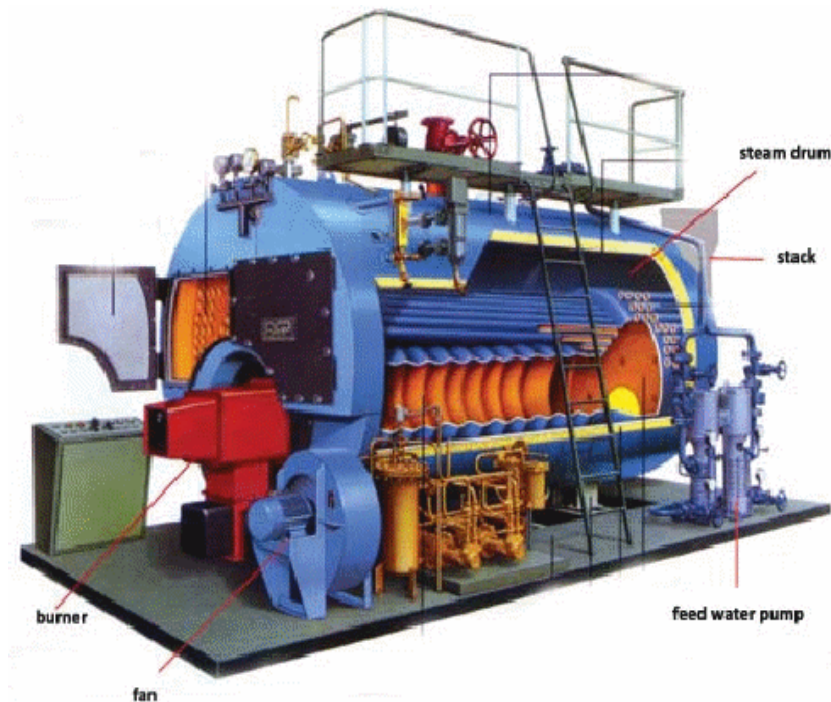
Berbagai bentuk boiler telah berkembang mengikuti kemajuan teknologi dan evaluasi dari produk-produk boiler sebelumnya yang dipengaruhi oleh gas buang boiler yang mempengaruhi lingkungan dan produk *steam* seperti apa yang akan dihasilkan. Berikut adalah beberapa macam klasifikasi Boiler :

##### **2.2.1. Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa:**

###### **a. Ketel pipa api (fire tube boiler)**

Pada ketel pipa api seperti tampak pada Gambar 2.1, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan ketel ada didalam shell untuk dirubah menjadi steam. Ketel pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah dan sedang. Sebagai pedoman, ketel pipa api kompetitif untuk kecepatan steam sampai 14.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. Ketel pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam

operasi. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar ketel pipa api dikonstruksi sebagai “paket” boiler ( dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



*Sumber Murni, Buku ajar ketel uap, 2012*

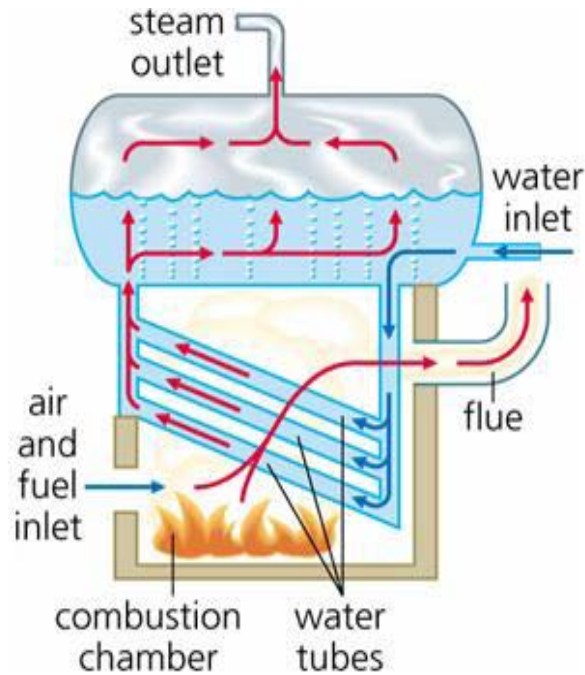
Gambar 2.1 Ketel Pipa Api (Omnicol)

b. Ketel pipa air (water tube boiler)

Pada Ketel pipa air seperti tampak pada Gambar 2.2, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Untuk ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel pipa air sebagai berikut:

- Force, induce dan balance draft membantu untuk meningkatkan efisiensi.

- Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari pengolahan air.
- Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.



*Sumber Murni, Buku ajar ketel uap, 2012*

Gambar 2.2 Ketel Pipa Air (YourDitionary.com)

### 2.2.2 Berdasarkan pemakaiannya:

- a. Ketel Stasioner (Stasionary boiler) atau ketel tetap

Merupakan ketel-ketel yang didudukan di atas fundasi yang tetap, seperti ketel untuk pembangkit tenaga, untuk industri dan lain-lain sebagainya.

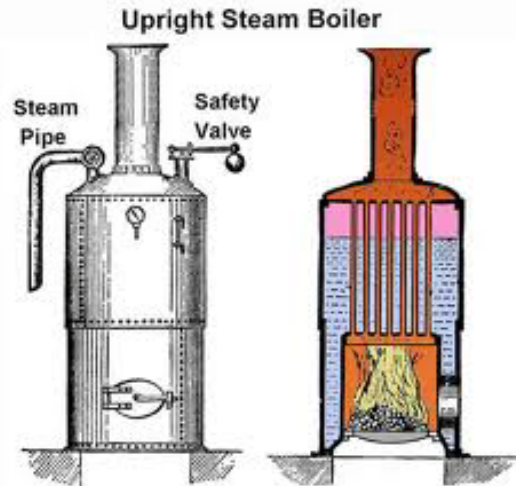
- b. Ketel mobil ( mobil boiler) , ketel pindah atau portable boiler

Merupakan ketel yang dipasang fundasi yang berpindah-pindah (mobil), seperti boiler lokomotif, lokomobil, dan ketel panjang serta lain yang sebagainya termasuk ketel kapal (marine Boiler).

### 2.2.3 Berdasarkan pada poros tutup drum (shell)

#### a. Ketel Tegak

Ketel Tegak seperti tampak pada Gambar 2.3 (vertical steam boiler) adapun contoh ketel tegak adalah ketel Cocharn, Ketel Clarkson dan lain-lainnya.

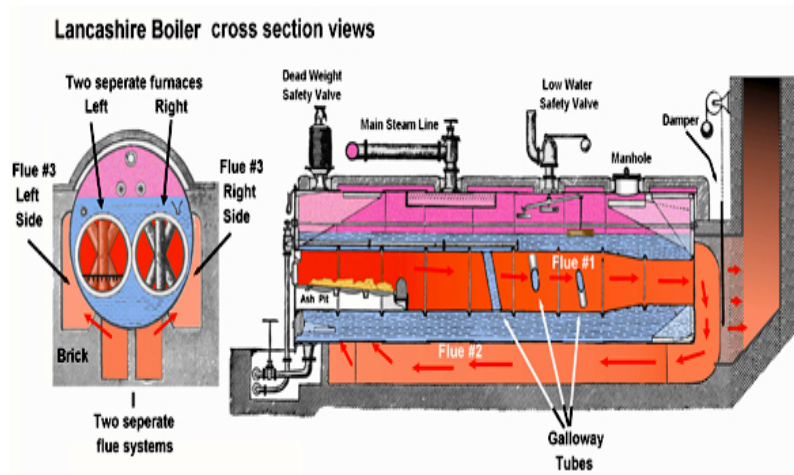


Sumber Murni, Buku ajar ketel uap, 2012

Gambar 2.3 Ketel Tegak (UNEP)

#### b. Ketel mendatar (horizontal steam Boiler),

Adapun yang termasuk jenis ketel ini adalah ketel Cornish, Lancashire( tampak pada Gambar 2.4) , Scotch dan lain-lain.



'Sumber Murni, Buku ajar ketel uap, 2012'

Gambar 2.4 Ketel Mendatar (Lancashire)

#### 2.2.4 Berdasarkan bentuk dan letak pipa:

- a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan terlekak-lekuk (straight, bent and sinous tubuler heating surface).
- b. Ketel dengan pipa miring datar dan miring tegak ( horizontal, inclined or vertical tubuler heating surface).

#### 2.2.5 Berdasarkan tekanan kerjanya:

- a. Ketel dengan peredaran alami ( natural circulation steam boiler)

Merupakan boiler dengan peredaran air didalam ketel terjadi secara alami yaitu air yang ringan naik, sedangkan air yang berat turun, sehingga terjadi aliran konveksi alami. Umumnya ketel beroperasi secara aliran alami, seperti ketel Lancashire, Babcock & Wilcox dan lain-lain.

- b. Ketel dengan peredaran paksa ( force circulation steam boiler)

Merupakan Boiler dengan aliran paksa, aliran paksa diperoleh dari pompa sentrifugal yang digerakan secara electric motor, misalnya system aliran paksa pada ketel-ketel bertekanan tinggi misalnya La-mont Boiler, Benson Boiler, Loeffler Boiler dan Velcan Boiler.

#### 2.2.6 Berdasarkan kapasitasnya:

- a. Tekanan kerja rendah :  $\leq 5$  atm
- b. Tekanan kerja sedang :  $> 5-40$  atm
- c. Tekanan kerja tinggi :  $> 40-80$  atm
- d. Tekanan kerja sangat tinggi :  $> 80$  atm

#### 2.2.7 Berdasarkan pada sumber panasnya:

- a. Ketel uap dengan bahan bakar alami.
- b. Ketel uap dengan bahan bakar buatan.

- c. Ketel uap dengan dapur listrik.
- d. Ketel uap dengan energi nuklir.

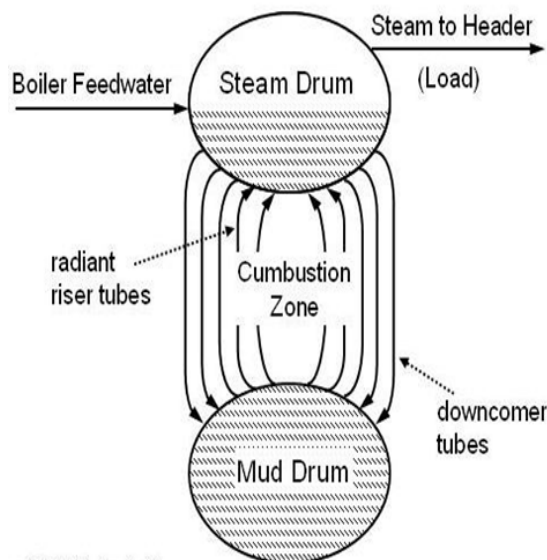
### **2.3 Boiler Unit 10 PLTU 1 Jawa Tengah Rembang**

PLTU 1 Jawa Tengah Rembang merupakan PLTU yang memiliki 2 buah unit pembangkit yaitu unit 10 dan unit 20 yang menghasilkan daya 2 x 315 MW. Pada Unit 10 terdapat beberapa komponen untuk menghasilkan energi listrik salah satunya Boiler. Boiler pada PLTU 1 Jawa Tengah Rembang unit 10 merupakan Boiler dengan jenis parameter sub-critical, memiliki 20 burner batubara, 12 burner minyak, tekanan berimbang pada furnace, satu furnace (ruang bakar), satu sistem reheat, pembuangan kerak padat, menggunakan kerangka baja, dengan pelindung hujan pada atas boiler. Dinding ruang bakar ketel terbuat dari pipa-pipa air dan pipa-pipa penguapan sedang bagian luarnya dibungkus dengan isolasi tahan panas. adapun berikut spesifikasi boiler unit 10 PLTU 1 Jawa Tengah Rembang adalah sebagai berikut:

Model	: DG1025/18.2-II13 Dongfang Boiler Co.Ltd
Kapasitas	: 1025 ton/jam
Tek. Uap superheater	: 17,4 Mpa
Temp. Uap superheater	: 541 C
Bahan bakar penyalan	: HSD
Bahan bakar utama	: Batu bara low rank
Jumlah Burner batu bara	: 20 buah
Jumlah Burner minyak	: 12 buah
Dimensi Ruang Bakar	: 14706.6×13743.4mm. Ketinggian 62.8m

Boiler merupakan suatu alat untuk menghasilkan uap pada tekanan dan temperatur tinggi (superheated vapour). Perubahan dari fase cair menjadi uap dilakukan dengan memanfaatkan energi panas yang didapatkan dari pembakaran bahan bakar. Boiler pada PLTU 1 Jawa Tengah Rembang menggunakan Batubara sebagai bahan bakar utamanya. Sedangkan bahan bakar pendukung adalah HSD, dimana HSD ini digunakan hanya sebagai pemantik awal (ignition) untuk membakar Batubara. Proses pembakaran ke dinding boiler terjadi secara radiasi dan konveksi.

Bagian pemindah panas dari boiler unit 10 terdiri dari pemanas mula (Low pressure heater, deaerator dan high pressure heater), economizer, pemanas lanjut temperatur rendah (primary superheater), pemanas lanjut temperatur tinggi (secondary superheater), dan pemanas ulang (reheater). Sirkulasi air yang terjadi dalam boiler berlangsung secara alami seperti yang terlihat dalam Gambar 2.5 yaitu suatu sirkulasi yang terjadi di dalam ketel uap disebabkan oleh adanya perbedaan berat jenis air dengan berat jenis uap tersebut.



Sumber Fahrizal,2010

Gambar 2.5 Skema sederhana ketel uap (boiler) sirkulasi alami

Pemindahan panas dalam boiler terjadi dalam proses :

1. Radiasi di ruang bakar
2. Konveksi di economizer, air heater, dan primary superheater
3. Kombinasi radiasi dan konveksi di secondary superheater dan reheater

Fungsi utama Boiler adalah :

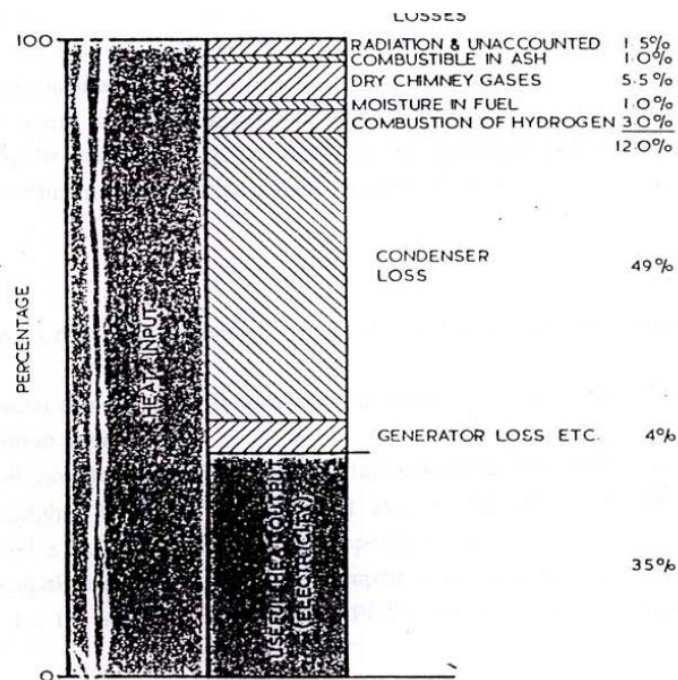
1. Untuk memproduksi uap sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan, baik kuantitas maupun kualitasnya.
2. Memanaskan uap jenuh yang dihasilkan menjadi uap panas lanjut sebelum digunakan untuk memutar turbin.
3. Memanaskan ulang uap bekas memutar HP turbin sebagai metode pengembalian kualitas uap untuk memutar IP dan LP turbin.

#### **2.4 Istilah Efisiensi**

Seperti telah kita maklumi bahwa hasil keluaran (output) dari PLTU adalah berupa energi listrik sedang sebagai masukan (input) nya adalah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar. Idealnya, kita menghendaki agar energi kimia (input) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (output). Tetapi pada kenyataannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (losses) yang terjadi hampir disetiap komponen PLTU. Akibat kerugian-kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dari energi kimia yang masuk ke sistem PLTU.

Dalam kaitannya dengan output dan input, seringkali kita mendengar istilah efisiensi. Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. efisiensi suatu pembangkit dalam

kaitannya dengan input, output dan losses dapat diilustrasikan seperti tampak pada Gambar 2.6.



Sumber Diklat PT PLN

Gambar 2.6 Korelasi Input, Output dan Losses terhadap efisiensi

PLTU dirancang untuk menghasilkan output berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah input berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu pula. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (performance) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga menjadi rendah. Seandainya karena suatu sebab unjuk kerja PLTU turun, berarti PLTU memerlukan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan output energi listrik sesuai desain. Akibatnya biaya operasi menjadi semakin tinggi. Umumnya PLTU hanya mampu mengubah sekitar 35% dari energi input dalam bahan bakar menjadi energi listrik. Sisa energi lainnya berubah menjadi kerugian - kerugian (losses) yang terjadi pada berbagai tahapan proses transformasi energi.

Sebagian besar dari energi ini terbuang keluar meninggalkan siklus PLTU bersama gas bekas (flue gas) yang mengalir dari cerobong, terbawa oleh air pendingin utama (circulating water) didalam kondensor, terbuang ke lingkungan sekitar dan lain sebagainya.

## 2.5 Efisiensi Boiler

PLTU adalah Unit Pembangkit Termal yang merupakan suatu sistem yang terdiri dari berbagai komponen-komponen seperti : Boiler, Turbin, Generator dan alat-alat bantu lainnya. Masing-masing komponen memiliki besaran efisiensi turbin dengan turbinnya, generator dengan efisiensi generator dan demikian pula dengan alat-alat bantu lainnya. Bila efisiensi dari masing-masing komponen tersebut dikombinasikan, maka akan diperoleh efisiensi keseluruhan dari sistem PLTU. Efisiensi menyeluruh ini dapat ditemukan melalui persamaan berikut<sup>1</sup>

$$\eta_m = \eta_{th} + \eta_k + \eta_t + \eta_g + \eta_a \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

Keterangan :

- $\eta_m$  : Efisiensi keseluruhan PLTU
- $\eta_{th}$  : Efisiensi Thermal
- $\eta_k$  : Efisiensi Ketel
- $\eta_t$  : Efisiensi Turbin
- $\eta_g$  : Efisiensi Generator
- $\eta_a$  : Efisiensi Alat bantu

Effisiensi PLTU tidak lepas dari peran Boiler yang merupakan komponen utama yang terdapat dalam PLTU sehingga tingkat unjuk kerja (effisiensi) Boiler harus selalu dipantau sehingga memperoleh unjuk kerja yang maksimal untuk meningkatkan effisiensi PLTU sendiri. Menurut ASME PTC 4.1 untuk

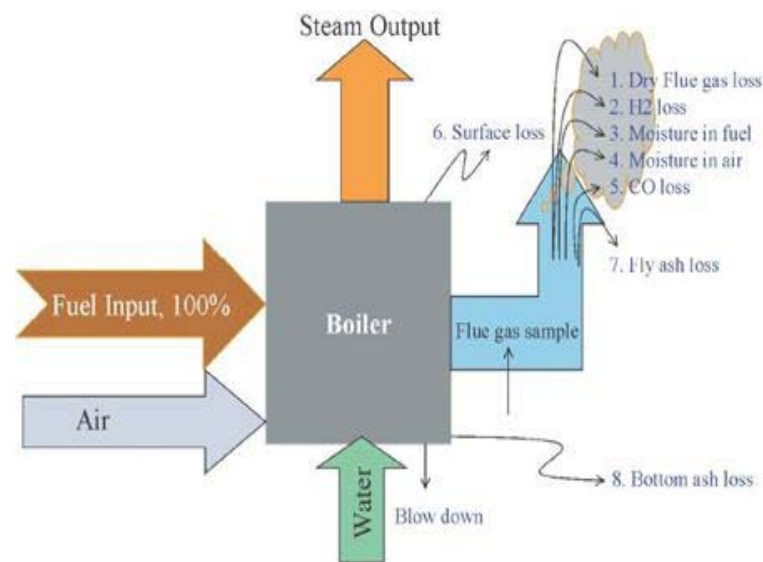
---

<sup>1</sup> Udiklat Suralaya PT PLN (Persero), Modul 2 Pengoperasia (Effisiensi),PT PLN (Persero), Suralaya,2008, hal. 4

menghitung efisiensi Boiler dapat diperoleh dengan dua metode yaitu dengan metode tidak langsung (indirect) dan metode langsung (direct)

### 2.5.1 Perhitungan Efisiensi dengan Metode Tidak Langsung (*Indirect*)

Perhitungan Efisiensi dengan Metode Tidak Langsung (*Indirect*) merupakan perhitungan efisiensi Boiler yang menggunakan perbandingan antara kehilangan energi dengan energi yang masuk sesuai ilustrasi pada gambar



Sumber Buerau of Energy Effisiensi

Gambar 2.7 Skema Indirect Method

Adapun persamaan untuk menghitung efisiensi Boiler dengan metode ini adalah sebagai berikut<sup>2</sup>

$$\eta = \frac{\text{Input} - \text{Losses}}{\text{Input}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

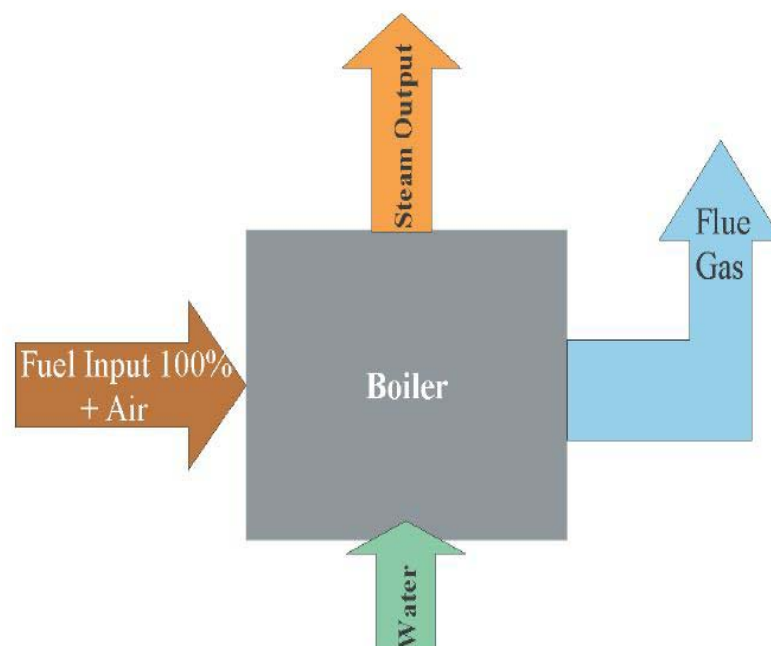
Input merupakan energi panas yang diperoleh dari tranformasi energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar, sehingga input merupakan nilai kalori bahan bakar. Sedangkan untuk losses atau kerugian didapat seperti tampak pada ilustrasi gambar yaitu

<sup>2</sup> Ibid, hal. 6

1. Kerugian panas karena gas panas kering ( *dry flue gas loss* )
2. Kerugian panas karena kandungan hidrogen dalam bahan bakar ( *H<sub>2</sub> in fuel* )
3. Kerugian panas karena kandungan air dalam bahan bakar ( *moisture in fuel* )
4. Kerugian panas karena kandungan air dalam udara ( *moisture in air* )
5. Kerugian panas karena *Carbon Monoksida* ( *CO loss* )
6. Kerugian panas karena permukaan radiasi, konveksi dan yang tidak terhitung lainnya.
7. Kerugian karena tidak terbakarnya *fly ash*( *carbon* )
8. Kerugian karena tidak terbakarnya *bottom ash* ( *carbon* )

### 2.5.2 Perhitungan Effisiensi dengan Metode Langsung (*Direct*)

Perhitungan efisiensi dengan metode langsung (direct) Boiler merupakan perhitungan efisiensi Boiler yang menggunakan perbandingan antara fluida kerja (air dan Steam ) dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar sesuai dengan ilustrasi gambar .



Sumber Buerau of Energy Effisiensi

Gambar. 2.8 Skema Direct Method

Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi Boiler dengan metode langsung (direct) sebagai berikut<sup>3</sup>

$$\text{Boiler efisiensi} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \% (\%) \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

Keterangan :

$Q_{in}$  : energi masuk (KJ/jam)

$Q_{out}$  : energi keluar (KJ/jam)

Energi masuk merupakan energi yang dibutuhkan oleh boiler untuk menghasilkan energi. Energi masuk Boiler didapat dari hasil pembakaran batubara sehingga di dapat persamaan<sup>4</sup> :

$$Q_{in} = Q_{rl} = Q_{rF} = MrF HHVF \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

Keterangan :

$MrF$  : laju aliran batubara (t/h)

$HHVF$  : nilai kalori bahan bakar (Kj/Kg)

Sedangkan Energi keluar merupakan energi yang dihasilkan oleh Boiler yaitu merupakan jumlah keseluruhan energi dari superheater dan reheater. Adapun untuk mencari jumlah total energi keluar yaitu menggunakan persamaan sebagai berikut<sup>5</sup> :

$$Q_{out} = Q_{rO} + Q_{Rh} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

Keterangan

$Q_{rO}$  : Subtotal energi keluaran dari Superheater (KJ/jam)

$Q_{Rh}$  : Subtotal energi keluar dari Reheater (KJ/jam)

---

<sup>3</sup> Ibid, hal 5

<sup>4</sup> The American Society of Mechanical Engineers, Fire Steam Generator Performance Test Codes, ASME, U.S.A, 2009, hal. 71

<sup>5</sup> PT Pembangkit Jawa Bali UBJOM PLTU Rembang, Performance Monitoring Report, Randal Operasi PLTU Rembang, Rembang, 2012, hal. Lampiran 5

Subtotal energi keluaran dari Superheater merupakan jumlah energi dari main steam ditambahkan energi dari Superheater spray, sehingga Subtotal energi keluaran dari Superheater dapat di dapat dengan persamaan<sup>6</sup> :

$$Q_{ro} = ((MrSt32-MrW25)x(HSt32-HW24)) + (MrW25(HSt32-HW25)).....(2-6)$$

Keterangan :

- $Q_{ro}$  : subtotal energi keluaran dari Superheater ( KJ/jam )  
 $MrSt32$  : laju aliran main steam (ton/jam)  
 $MrW25$  : laju aliran superheater spray (ton/jam)  
 $HSt32$  : enthalpy main steam (KJ/Kg)  
 $HW24$  : enthalpy feedwater (KJ/Kg)  
 $HW25$  : enthalpy superheater spray (KJ/Kg)

Sedangkan Subtotal energi keluar dari Reheater merupakan jumlah dari energi uap Reheater ditambahkan dengan energi dari Reheater Spray. Sehingga dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut<sup>7</sup> :

$$Q_{Rh} = (MrSt33x(HSt34-HSt33))+ (MrW26 x (HSt34-HW26)).....(2-7)$$

Keterangan:

- $Q_{Rh}$  : subtotal energi keluar dari Reheater (KJ/jam)  
 $MrSt33$  : laju aliran uap hot reheater (ton/jam)  
 $MrW26$  : laju aliran uap reheater spray (ton/jam)  
 $HSt34$  : enthalpy uap hot reheater (KJ/Kg)  
 $HSt33$  : enthalpy uap cold reheater (KJ/Kg)  
 $HW26$  : enthalpy uap reheater spray (KJ/Kg)

---

<sup>6</sup> The American Society of Mechanical Engineers, loc. cit

<sup>7</sup> ibid, hal. 71