

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian 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.

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berupa tanki/drum/vessel tertutup yang terbuat dari baja yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap atau dengan kata lain mentransfer panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar (baik dalam bentuk padat, cair atau gas) sehingga air berubah wujud menjadi uap. Di dalam boiler, energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi panas melalui proses pembakaran dan panas yang dihasilkan sebagian besar diberikan kepada air yang berada di dalam ketel, sehingga air berubah menjadi uap. Boiler didukung menggunakan peralatan-peralatan khusus seperti Safety valve, Level Glass, Block Valve, Burner pembakaran dan alat bantu lainnya (Pertamina, 1993).

Energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem boiler memiliki nilai tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan steam yang akan digunakan. Berdasarkan ketiga hal tersebut sistem boiler mengenal keadaan tekanan-temperatur rendah (low pressure/LP), dan tekanan-temperatur tinggi (high pressure/HP), dengan perbedaan itu pemanfaatan steam yang keluar dari sistem boiler dimanfaatkan dalam suatu proses untuk memanaskan cairan dan menjalankan suatu mesin (commercial and industrial boilers), atau membangkitkan energi listrik dengan merubah energi kalor menjadi energi mekanik kemudian memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik (power boilers). Namun, ada juga yang menggabungkan kedua sistem boiler tersebut, yang memanfaatkan tekanan-temperatur tinggi untuk membangkitkan energi listrik, kemudian sisa steam dari turbin dengan keadaan tekanan-temperatur rendah dapat dimanfaatkan ke dalam proses industri.

Sistem boiler terdiri dari sistem air umpan, sistem steam, dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan dari sistem air umpan, penanganan air umpan diperlukan sebagai bentuk pemeliharaan untuk mencegah terjadi kerusakan dari sistem steam. Sistem steam 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 adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

2.2 Klasifikasi Boiler

Boiler/ketel uap pada dasarnya terdiri dari bumbung (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. Dalam laporan ini ketel uap diklasifikasikan dalam kelas yaitu:

2.2.1 Berdasarkan fluida yang mengalir dalam pipa, maka ketel diklasifikasikan sebagai:

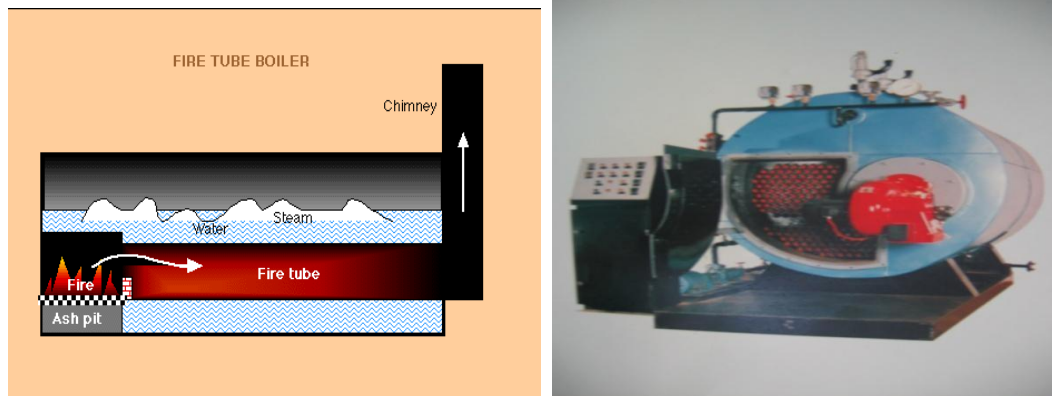
a. Ketel pipa api (fire tube boiler)

Pada ketel pipa api, fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas nyala (hasil pembakaran), yang membawa energi panas (thermal energy), yang segera mentransfernya ke air ketel melalui bidang pemanas. Tujuan pipa-pipa api ini adalah untuk memudahkan distribusi panas (kalor) kepada air ketel.

Fire tube boiler mengalirkan air melalui shell dengan menerima panas dari gas pembakaran yang mengalir melalui susunan pipa api. Fire tube boiler memiliki tekanan operasi standar yaitu maksimum 250 psi (16 bar) pada umumnya berkapasitas kurang dari 7 ton/jam (Dalimunthe, 2006). Kemudian pada proses perubahan air menjadi steam dilakukan didalam drum dimana air dipanaskan dengan gas buang dari ruang bakar yang disalurkan melalui bagian

dalam pipa api, dengan kata lain bahwa pipa api berupa peralatan transfer panas dan tidak berisi air.

Api/gas asap mengalir dalam pipa sedangkan air/uap diluar pipa Drum berfungsi untuk tempat air dan uap, disamping itu drum juga sebagai tempat bidang pemanas. Bidang pemanas terletak di dalam drum, sehingga luas bidang pemanas yang dapat dibuat terbatas.



Gambar 2.1 diagram sederhana fire tube boiler

(Sumber : Murni, Buku ajar ketel uap, 2012)

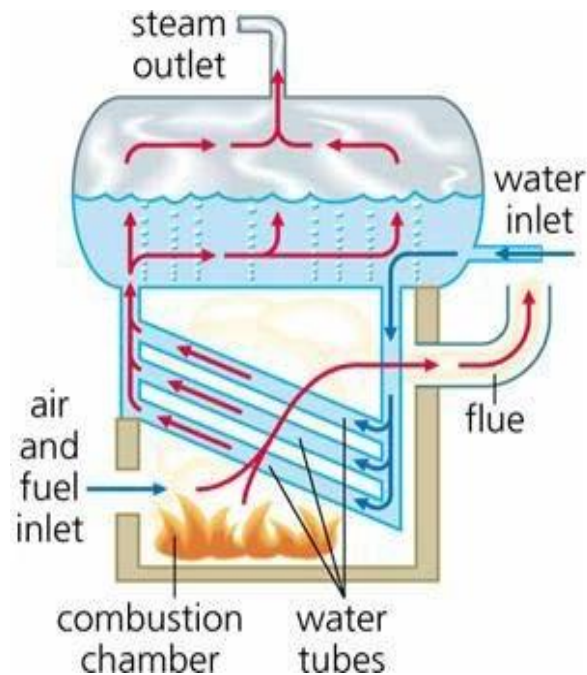
b. Ketel pipa air (water tube boiler)

Di dalam water tube boiler, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam drum. Steam terbentuk karena sirkulasi air yang dipanaskan oleh gas pembakar yang terjadi di daerah uap di dalam drum. Sebagai ketel yang sudah sangat modern, water tube boiler biasanya dirancang dengan tekanan sangat tinggi dan memiliki kapasitas steam antara 4.500-12.000 kg/jam (UNEP, 2006).

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 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).

2.2.3 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.

2.2.4 Berdasarkan kapasitasnya:

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

2.2.5 Berdasarkan pada sumber panasnya:

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

Tabel 2.1. Keuntungan dan kerugian boiler berdasarkan tipe pipa.

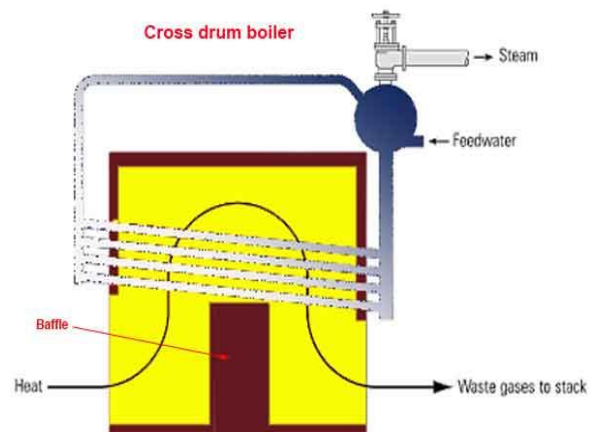
| No. | Tipe Boiler | Keuntungan | Kerugian |
|-----|-------------|---|---|
| 1 | Fire Tube | Proses pemasangan mudah dan cepat, Tidak membutuhkan setting khusus | Tekanan operasi steam terbatas untuk tekanan rendah 18 bar |
| | | Investasi awal boiler ini murah | Kapasitas steam relatif kecil (13.5 TPH) jika di bandingkan dengan water tube |
| | | Bentuknya lebih compact dan portable | Tempat pembakarannya sulit dijangkau untuk dibersihkan, diperbaiki, dan diperiksa kondisinya. |
| | | Tidak membutuhkan area yang besar untuk 1 HP boiler | Nilai effisiensinya rendah, karena banyak energi kalor yang terbuang langsung menuju stack |
| 2 | Water Tube | Kapasitas steam besar sampai 450 TPH | Proses konstruksi lebih detail |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | | Tekanan operasi mencapai 100 bar | Investasi awal relatif lebih mahal |
| | | Nilai effisiensinya relatif lebih tinggi dari fire tube boiler | Penanganan air yang masuk ke dalam boiler perlu dijaga, karena lebih sensitif untuk sistem ini, perlu komponen pendukung untuk hal ini |
| | | Tungku mudah dijangkau untuk melakukan pemeriksaan, pembersihan, dan perbaikan. | Karena mampu menghasilkan kapasitas dan tekanan steam yang lebih besar, maka konstruksinya dibutuhkan area yang luas |

Sumber: <http://febriantara.wordpress.com/2008/10/24/engineering-today/>

2.2.6 Cross Drum Boiler

Pada *Cross Drum Boiler steam drum* ditempatkan dengan cara silang ke sumber panas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar. 2.3. *Cross drum boiler*

(Sumber : <http://hima-tl.ppns.ac.id/ketel-uap-boiler>)

Di sini, *down-comer* dipasang pada bagian bawah *drum* dan riser dipasang pada bagian atas *drum* melalui pipa horisontal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. *Drum* beroperasi pada prinsip yang sama seperti *drum* membujur

kecuali bahwa itu mencapai suhu lebih seragam di drum. Namun itu tidak merusak risiko akibat sirkulasi yang rusak pada beban steam yang tinggi, jika tabung bagian atas menjadi kering, mereka dapat menjadi terlalu panas dan akhirnya gagal. Salib *drum boiler* juga memiliki keuntungan tambahan untuk dapat melayani sejumlah besar tabung miring karena posisi cara silang. Kapasitas untuk *drum* berbagai lintas *boiler* dari 700 kg / jam menjadi 240 000 kg / jam.

Prinsip kerja dari *Cross Drum Boiler*

- 1) Air umpan diumpankan ke salib *drum* melalui umpan masuk air.
- 2) Kemudian air ini turun melalui pipa *down-comer* dan masuk ke dalam tabung air cenderung ditempatkan dalam ruang panas.
- 3) Di sini, air menjadi panas dan uap diproduksi di dalam air yang datang ke dalam ruang uap.
- 4) Di sini pada *steam drum* uap dipisahkan dari air dengan cara alami.

2.3 Dasar Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik yang menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem – sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.3.1. Hukum Termodinamika I

Bunyi hukum Termodinamika I adalah “Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya saja.” Berdasarkan uraian tersebut terbukti bahwa kalor (Q) yang diserap sistem tidak hilang. Oleh sistem, kalor ini akan diubah menjadi usaha luar (W) dan atau penambahan energi dalam (U) (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.3.2. Hukum Termodinamika II

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.

$$\Delta S_{\text{tot}} \geq 0 \quad (1)$$

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuatan 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. 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.

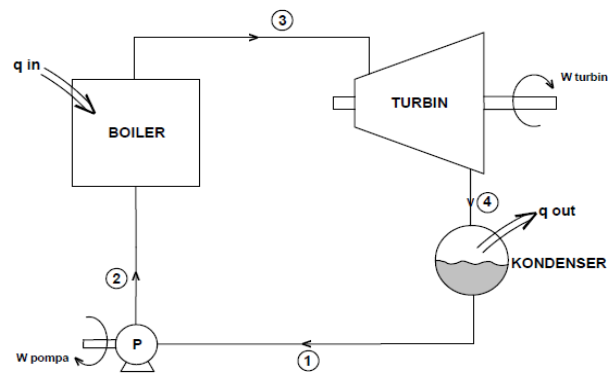
Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada 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 atur berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2)$$

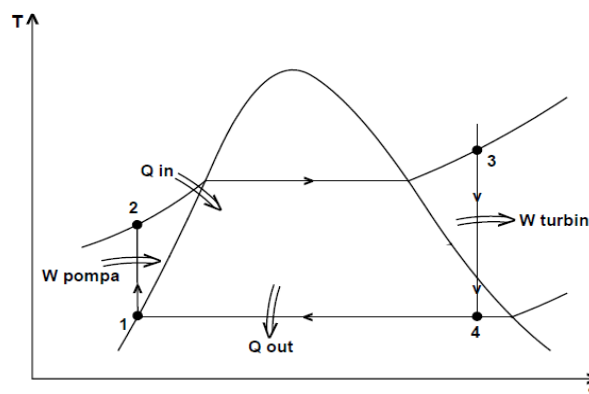
Dimana dQ mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus, T adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Sedangkan dS dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai entropi. Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram entropi sangat membantu untuk menentukan 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). Adapun penjelasan terdapat pada gambar berikut. Bentuk umum dari diagram entropi dapat dilihat pada

Gambar 2. 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 2. Untuk keadaan pada daerah ini, entropi ditentukan hanya dengan temperatur. Variasi tekanan antara beberapa keadaan tidak berpengaruh besar.



Gambar 2.4 Diagram alir siklus Rankine sederhana



Gambar 2.5 Diagram T-s siklus Rankine sederhana

2.4 Fungsi Boiler

Fungsi dari boiler adalah menghasilkan uap yang digunakan untuk kebutuhan proses pabrik, dan membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik maupun perumahan karyawan di sekitar pabrik. Adanya pengaruh pengotoran baik yang

ditimbulkan dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler (Asmudi, 2008).

Klasifikasi Boiler secara umum dibagi dua yaitu, Boiler pipa api dan Boiler pipa air. Jenis Boiler pipa api banyak digunakan oleh industri yang memerlukan tekanan uap yang relatif rendah, misalnya pabrik-pabrik gula. Sedangkan jenis pipa air digunakan oleh industri/pembangkit listrik yang memerlukan tekanan uap yang tinggi, misalnya pada pusat-pusat listrik tenaga uap.

2.5 Flame Temperature

Flame temperature adalah temperatur dimana suatu zat atau material melepaskan uap yang cukup untuk membentuk campuran dengan udara yang ada sehingga terbakar. walaupun banyak orang yang mengatakan bahwa temperatur nyala tidak dapat di tentukan secara nyata. Karena hal itulah para ahli mencari metode untuk menentukan nilainya secara teori. Temperatur nyala api ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu tergantung pada jenis bahan bakar dan oksida yang digunakan. Untuk api konvensional yang digunakan dalam fotometri nyala, temperatur nyala yang lebih tinggi diperoleh dengan oksigen digunakan sebagai oksida bukan udara, karena di dalam udara terdapat nitrogen yang dapat menurunkan suhu nyala api (Melisa, 2015).

Flame temperatur juga bervariasi sesuai dengan rasio masing-masing komponen dalam campuran yang mudah terbakar. jika campuran tidak masuk pembakar dalam komposisi optimal, bahan bakar kelebihan atau oksidan pemberat. Tidak berpartisipasi dalam reaksi dan gas inert seperti komponen berlebih menurunkan suhu nyala api.

2.6 Metode Pengkajian Efisiensi Boiler

Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada skripsi ini adalah metode langsung. Secara umum skripsi ini akan membahas analisa nilai kalor bahan bakar dan perhitungan efisiensi boiler.

Efisiensi adalah suatu tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat. Sedangkan efisiensi pada boiler atau ketel uap yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar.

Terdapat dua metode pengkajian efisiensi boiler :

2.6.1 Metode Langsung

Energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler.

a. Keuntungan metode langsung

- Pekerja pabrik dapat dengan cepat mengevaluasi efisiensi boiler
- Memerlukan sedikit parameter untuk perhitungan
- Memerlukan sedikit instrumen untuk pemantauan
- Mudah membandingkan rasio penguapan dengan data benchmark

b. Kerugian metode langsung

- Tidak memberikan petunjuk kepada operator tentang penyebab dari efisiensi sistem yang lebih rendah
- Tidak menghitung berbagai kehilangan yang berpengaruh pada berbagai tingkat efisiensi

2.6.2 Metode Tidak Langsung

Efisiensi merupakan perbedaan antar kehilangan dan energi masuk. Metodologi Standar acuan untuk Uji Boiler di tempat dengan menggunakan metode tidak langsung adalah *British Standard, BS 845:1987* dan *USA Standard ASME PTC-4-1 Power Test Code Steam Generating Units*.

a. Keuntungan metode tidak langsung

Dapat diketahui neraca bahan dan energi yang lengkap untuk setiap aliran, yang dapat memudahkan dalam mengidentifikasi opsi-opsi untuk meningkatkan efisiensi boiler.

b. Kerugian metode tidak langsung

- Perlu waktu lama
- Memerlukan fasilitas laboratorium untuk analisis.

2.7 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa

parameter yang lazim antara lain AFR (Air Fuel Ratio), FAR (Fuel Air Ratio), dan Rasio Ekivalen (ϕ).

2.7.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (Air Fuel Ratio/AFR)

Rasio ini merupakan parameter yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai adalah jumlah mol bahan bakar.

2.7.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (Fuel Air Ratio/ FAR)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dapat juga dinyatakan dalam perbandingan volume. Untuk bahan bakar gas, perbandingan volume lebih sering dipergunakan karena sebanding dengan perbandingan jumlah mol.

2.7.3 Rasio Ekivalen (Equivalent Ratio)

Rasio ini termasuk juga rasio yang umum digunakan. Rasio ekivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stokiometri dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan anatara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometri (Mahandri,2010:10).

2.8 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja *Two Drum Cross Section Water Tube Boiler* adalah solar dan LPG. Berikut adalah pembahasan mengenai kedua jenis bahan bakar tersebut.

2.8.1 Solar Bahan bakar

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:

1. Warna sedikit kekuningan dan berbau

2. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
3. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
4. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
5. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
6. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
7. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.