

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Boiler*

Boiler merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menghasilkan steam (uap) dalam berbagai keperluan. Air di dalam *boiler* dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar (sumber panas lainnya) sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam boiler. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar. 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. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. (MF Syahputra.2010).

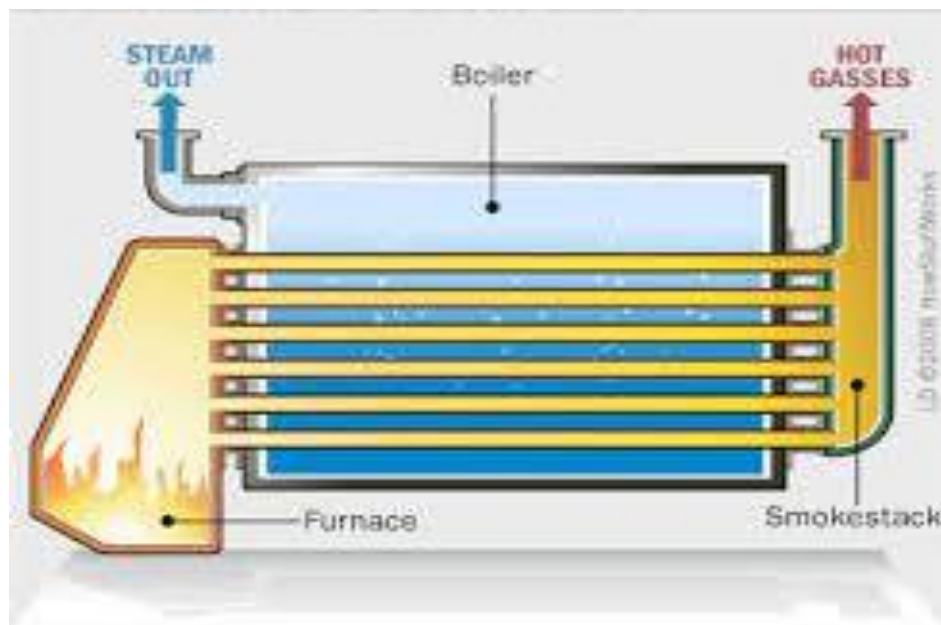
Decy Nataliana., dkk, (2012) melakukan penelitian tentang pengendali level ketinggian air pada *steam drum boiler* untuk mencapai keadaan optimal temperatur yang diinginkan tercapai dan stabil dengan indikator berupa *pressure steam*, temperatur gas keluaran *boiler* dan total produksi *steam* yang dihasilkan. Hasil dari penelitian menunjukkan perubahan temperatur *boiler* mempengaruhi *steam* yang dihasilkan sehingga berpengaruh pada level ketinggian air pada *drum boiler*, semakin tinggi temperatur maka penguapan semakin cepat dan level ketinggian air semakin berkurang dan kestabilan sistem terganggu sehingga dibutuhkan respon kendali yang cepat untuk menanggulangi masalah tersebut. Namun pada penelitian tersebut belum dilakukan pengamatan terhadap hubungan antara level ketinggian air pada saat produksi *steam* berlangsung dengan entalpi *steam* yang dihasilkan.

2.2 Jenis-Jenis Boiler

2.2.1 Boiler Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa –pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa –pipa api tersebut.

Dalam perancangan *boiler* ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar *boiler* yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan. Untuk lebih jelas *boiler* pipa api dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



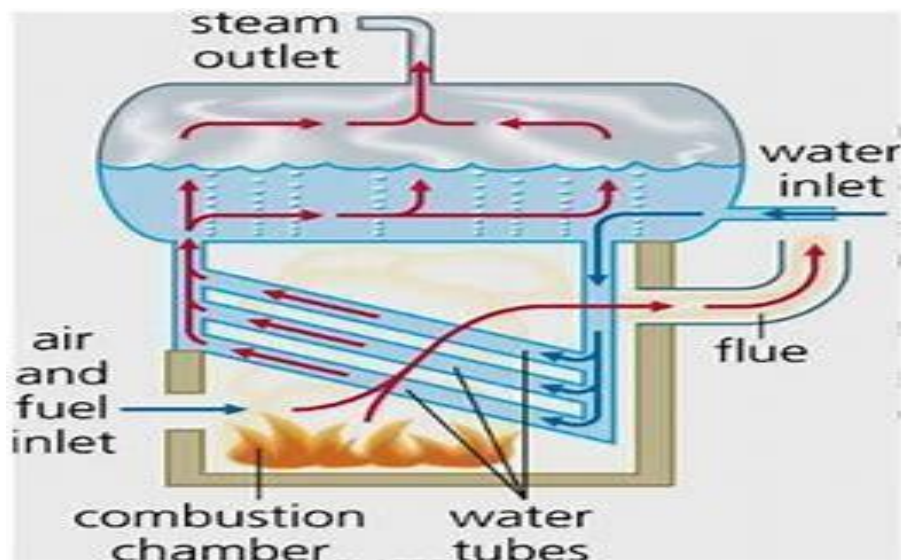
Gambar 2.1 Boiler Pipa Api

(sumber: Nianur37.2015. Boiler pipa api dan Boiler pipa air)

Boiler yang tergolong dalam jenis fire tube boiler adalah jenis boiler kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 Ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm², jadi tergolong ke dalam *boiler* bertekanan rendah karena kapasitas, tekanan, dan temperatur uap yang dihasilkan rendah maka *fire tube boiler* jarang digunakan untuk pengolahan modern. Kekurangannya adalah lambat dalam mencapai tekanan operasi pada awal operasi, dan keuntungan menggunakan boiler ini adalah fleksibel terhadap perubahan beban secara cepat (Dalimunthe, 2006).

2.2.2 Boiler Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Boiler pipa air, yaitu ketel uap dengan air atau uap berada di dalam pipa - pipa atau tabung dengan pipa api atau asap berada diluarnya. 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). Untuk lebih jelas *boiler* pipa air dapat dilihat pada **Gambar 2.2.**



Gambar 2.2. *Water Tube Boiler*

(sumber: Okifianti.2015.Boiler dan Jenisnya)

Umumnya *water tube boiler* terdiri dari beberapa *drum* (biasanya 2 atau 4 buah) dengan *eksternal tubes*. Biasanya ujung-ujung *tubes* disambung atau dihubungkan langsung dengan *drum-drum* dengan cara di roll atau di ekspansi, kadang kala sambungan antara *tubes* dengan *drum* selain di roll juga diperkuat dengan las atau seal welded. Apabila kapasitas *boiler* lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi *boiler* lebih besar dari 24 bar. Maka *boiler* dianggap cocok untuk produksi uap dalam jumlah besar dengan skala industri dengan uap yang dihasilkan yaitu *superheated* (Dalimunthe, 2006). Penggunaan *water tube boiler* diakui memiliki keuntungan yang lebih karena memiliki reaksi yang cepat terhadap beban, dan kelembapan panas termal yang dapat dikatakan kecil.

2.3 Prinsip Kerja Boiler

Air di dalam *boiler* dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar, sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air, yang mengakibatkan air tersebut menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin. Sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis lebih tinggi akan turun ke dasar (Djokosetyardjo, 1990).

Sistem yang dimiliki *boiler* untuk memenuhi kebutuhan *steam* terbagi menjadi beberapa sistem yaitu sistem air umpan (*feed water system*), sistem *steam* (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*) (UNEP, 2006).

- a. Sistem air umpan (*feed water system*) merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam *boiler*.
- b. Sistem *steam* (*steam system*) merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses produksi *steam* dan mengumpulkan berbagai data dalam *boiler* dengan cara mengalirkan uap ke titik pengguna dengan menggunakan sistem pemipaan.
- c. Sistem bahan bakar (*fuel system*) merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara menyuplai bahan bakar ke ruang pembakaran untuk menghasilkan panas.

2.4 Pompa

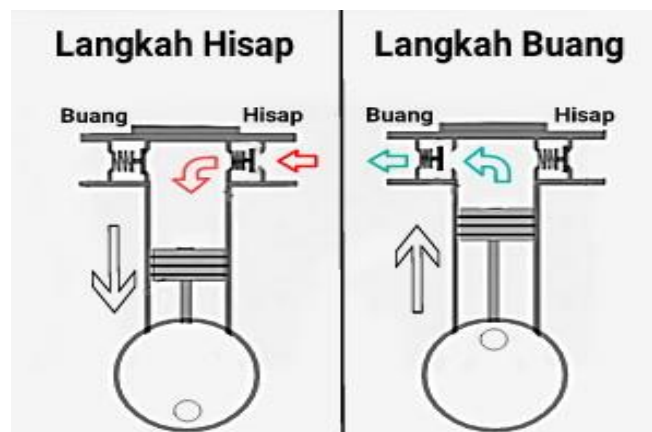
Pompa adalah alat untuk memindahkan fluida dari tempat satu ke tempat lainnya yang bekerja atas dasar mengkonversikan energi mekanik menjadi energi kinetik. Energi mekanik yang diberikan alat tersebut digunakan untuk meningkatkan kecepatan, tekanan atau elevasi (ketinggian). Pada umumnya pompa digerakkan oleh motor, mesin atau sejenisnya. Banyak faktor yang menyebabkan jenis dan ukuran pompa serta bahan pembuatnya berbeda, antara lain jenis dan jumlah bahan cairan tinggi dan jarak pengangkutan serta tekanan yang diperlukan dan sebagainya. Dalam suatu pabrik atau industri, selalu dijumpai keadaan dimana bahan-bahan yang diolah dipindahkan dari suatu tempat ke tempat yang lain atau dari

suatu tempat penyimpanan ketempat pengolahan maupun sebaliknya. Pemindahan ini dapat juga dimaksudkan untuk membawa bahan yang akan diolah dari sumber dimana bahan itu diperoleh. Kita tahu bahwa cairan dari tempat yang lebih tinggi akan sendirinya mengalir ketempat yang lebih rendah, tetapi jika sebaliknya maka perlu dilakukan usaha untuk memindahkan atau menaikkan fluida, alat yang lazim digunakan adalah pompa. Pemindahan fluida dengan menaikkan tekanan pada pompa adalah untuk mengatasi hambatan-hambatan yang terjadi, antara lain:

1. Hambatan Kecepatan Hambatan ini terjadi karena aliran fluida didalam tabung atau pipa mempunyai kecepatan tertentu, maka pompa harus memberikan tekanan yang diinginkan.
2. Hambatan Gesekan Hambatan ini terjadi pada gesekan sepanjang pipa-pipa yang dilaluinya.

2.5 Kompresor

Kompresor adalah suatu alat atau mesin yang meningkatkan tekanan udara atau fluida gas. Alat ini dapat menyala dengan menggunakan bahan bakar bensin atau mesin diesel sebagai tenaga penggerakannya.



Untuk prinsip atau cara kerjanya sendiri nantinya alat bernama kompresor ini tidak jauh berbeda dengan pompa ban mobil maupun sepeda pada umumnya. Dimana ketika piston ditarik ke atas, tekanan silinder dibawah akan menurun sampai dibawah tekanan atmosfer.

Nantinya udara luar tersebut akan dapat masuk lewat celah katup hisap. Dari sinilah udara masuk ke pompa kemudian dimampatkan oleh piston yang nantinya

didorong ke bawah. Karena udara dimampatkan, maka volumenya nantinya akan menjadi lebih kecil dan mengalir ke tempat yang memiliki tekanan udara lebih rendah.

Alat bernama kompresor sendiri memiliki fungsi utama untuk mengambil gas atau udara dari sekitar, lalu kemudian alirkan dan diberi tekanan di dalam tabung lalu akan disalurkan kembali sebagai udara yang memiliki tekanan tinggi. Itu fungsi utamanya, nantinya tekanan udara tersebut dapat dimanfaatkan untuk beberapa keperluan, seperti:

- Mengisi udara ban motor, mobil dan lainnya.
- Menyuplai udara untuk alat-alat spray atau air brush dalam pengecatan.
- Menyuplai udara bagi para penyelam.
- Menyuplai udara bersih dengan tekanan tinggi untuk mengisi tabung gas.
- Menyuplai udara bersih yang memiliki tekanan pada sistem kontrol Heating, Air Conditioning (HVAC) pneumatic dan Ventilaiton di bangunan-bangunan perkantoran, sekolah dan gedung-gedung.
- Menghasilkan udara bertekanan dalam volume besar sebagai keperluan proses industri skala besar. Seperti sistem purge di pabrik semen.

2.6 Blower

Menurut Slamet Nugroho (2012). Blower adalah Mesin atau alat yang digunakan untuk menaikkan atau memperbesar tekanan udara atau gas yang akan dialirkan dalam suatu ruangan tertentu , juga sebagai pengisapan atau pemvakuman udara atau gas tertentu. Biasanya blower digunakan untuk mensirkulasikan gas-gas tertentu didalam suatu ruangan. Selain itu blower merupakan mesin yang memampatkan udara atau gas oleh gaya sentrifugal ketekanan akhir yang melebihi dari 40 psig. Blower tidak didinginkan dengan air karena karena penambahan biaya yang dibutuhkan untuk system pendinginan tidak menguntungkan atau efisiensi bila ditinjau dari keuntungan yang diperoleh begitu kecil dari kinerja blower ini.

2.7 Hukum Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik 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.

2.7.1. Hukum Pertama Termodinamika

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

$$\Delta(\text{Energi sistem}) + \Delta(\text{Energi sekeliling}) = 0 \dots (2.1)$$

(Sumber: Pudjanarso dan Nursuhud, 2006)

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

1. Energi dalam sistem yang terisolasi adalah tetap. Pengamatan ini sering diringkas dengan ucapan bahwa energi bersifat kekal. Bukti kekekalan energi adalah kemustahilan untuk membuat mesin yang bergerak terus menerus, yang bekerja tanpa bahan bakar; mustahil untuk menciptakan atau menghancurkan energi.
2. Sifat kedua dari energi dalam adalah perpindahan energi. Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem. Energi adalah energi, bagaimanapun cara memperolehnya atau menghabiskannya.

Kedua sifat energi ini diringkaskan dalam sebuah pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika

diubah dengan melakukan kerja atau dengan pemanasan (Atkins, 1999). Menurut Daryus dalam Febriani Rizki (2017), sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh kalor mesti sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur. Secara matematis dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$Q = \Delta U + W \dots (2.2)$$

Dimana :

Q = kalor yang dipindahkan

ΔU = perubahan energi dalam

W = kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

2.7.2 Hukum Kedua Termodinamika

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

$$\Delta S_{tot} \geq 0 \dots (2.3)$$

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.

Setiap langkah yang sangat kecil di sepanjang jalannya bersifat reversibel, dan terjadi tanpa menyebarkan energi secara kacau, sehingga juga tanpa menaikkan entropi. Proses reversibel tidak menghasilkan entropi, melainkan hanya memindahkan entropi dari suatu bagian sistem terisolasi ke bagian lainnya (Atkins, 1999). Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem.

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

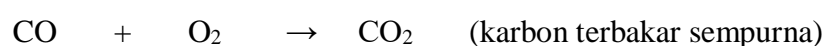
$$dS = dQ/T \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana dQ adalah perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus, T adalah temperatur absolut pada daerah batas tersebut. Sedangkan dS dapat mewakili tingkat ketidaksamaan atau nilai entropi. Pada saat hukum kedua termodinamika diterapkan, diagram entropi sangat membantu untuk menentukan lokasi dan menggambarkan proses pada diagram dimana koordinatnya adalah nilai entropi. Diagram dengan salah satu sumbu koordinat berupa entropi yang sering digunakan adalah diagram temperatur-entropi ($T-s$) dan diagram entalpi-entropi ($h-s$).

2.8 Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar yang disertai dengan adanya produksi panas dan cahaya. Pembakaran sempurna terjadi jika perbandingan bahan bakar dan pasokan oksigen yang tepat. Bila oksigen terlalu banyak, pembakaran akan menghasilkan api oksidasi. Sebaliknya jika bahan bakar terlalu banyak, pembakaran akan menghasilkan api reduksi.

Dalam proses suatu pembakaran jika tidak ada cukup oksigen, maka karbon tidak akan terbakar seluruhnya, contohnya sebagai berikut:



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

1. *Temperature*

Temperature yang digunakan untuk pembakaran yang baik adalah dengan menggunakan *temperature* yang tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia.

2. Turbulensi

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan oksidator. Oksigen didalam udara yang dialirkan ke ruang bakar ada kemungkinan dapat langsung mengalir ke cerobong tanpa kontak dengan bahan bakar. Turbulensi udara akan membentuk pencampuran yang baik antara udara bahan bakar sehingga akan diperoleh proses pembakaran yang sempurna.

3. *Time*

Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia. Setiap reaksi kimia memerlukan waktu tertentu untuk pembakaran.

2.9 Proses Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas dari sumber panas ke penerima panas dibedakan atas tiga cara, yaitu perpindahan panas secara konveksi, konduksi, dan radiasi. (Mc. Cabe, 1999).

2.9.1 Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya rendah dengan media penghantar panas tetap. Perpindahan panas konduksi terjadi pada benda padat. Tetapi molekul-molekul benda padat yang satu tidak berpindah ke benda padat yang lain. Di dalam *boiler* pada pipa-pipa air, panas dirambatkan oleh molekul-molekul pipa air bagian dalam yang berbatasan langsung dengan air ataupun *steam drum* dan *water drum*.

2.9.2 Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi/aliran adalah proses perpindahan panas melalui molekul-molekul fluida cair atau gas. Bila suatu pipa panas dialiri fluida tersebut akan menghantarkan panas ke seluruh bagian fluida lainnya. Perpindahan panas secara konveksi dibagi menjadi dua jenis yaitu:

a. Konveksi Alami

Konveksi alami merupakan perpindahan panas melalui fluida secara alami, misalnya dengan memanaskan sebatang pipa kemudian dibiarkan pipa tersebut menjadi dingin, fluida yang menghantar kalor adalah udara terbuka. Konveksi alami terjadi pada antar molekul air didalam pipa air yang mendapatkan panas dari dinding pipa serta air panas dari pipa air yang menghantarkan panas ke fluida yang berada di *steam drum* dan sebagainya.

b. Konveksi Paksa

Konveksi paksa adalah konveksi yang terjadi karena disengaja. Atau perpindahan panas yang mana alirannya tersebut berasal dari luar, seperti dari blower atau kran dan pompa.

2.9.3 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.

2.10 *Saturated steam dan Superheated steam*

Pada dasarnya, *steam* (uap air) itu dibuat dari air yang dipanaskan. *Steam* dihasilkan dari ketel uap atau *boiler*, dimana air yang sudah dibebas mineralkan atau *demin water* dipompakan ke dalam *boiler* yang terdiri dari susunan *tube* atau pipa yang saling sambung dan dipanaskan pada suhu tertentu.

Saturated steam atau *steam* basah adalah *steam* yang dihasilkan dari proses pembuatan *steam* tingkat pertama di *boiler*, dimana biasanya suhunya berkisar antara 150-300°C. Namun, pada intinya adalah *saturated steam* merupakan *steam* yang dihasilkan dari pemanasan air. *Saturated steam* ini masih banyak mengandung

air sehingga mudah membentuk air kembali akibat kondensasi karena penurunan suhu akibat pipa distribusi *steam* yang terlalu jauh.

Superheated steam sendiri merupakan *steam* yang terbuat dari *saturated steam* yang dipanaskan kembali dalam *boiler* sampai suhu $\pm 700^{\circ}\text{C}$. *Steam* ini betul-betul sangat kering.

2.11 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah segala sesuatu yang dapat diubah menjadi energi. Bahan bakar memiliki kandungan zat/energi bersifat panas dan dapat dilepaskan serta dimanipulasi. Undang-undang No. 22 Tahun 2001 Pasal 1 ayat 11 menyebutkan “Bahan Bakar Minyak adalah bahan bakar yang berasal dan/atau diolah dari Minyak Bumi”. Menurut wujudnya, bahan bakar dibedakan dalam 3 bentuk yaitu:

1. Bahan Bakar Padat

Bahan bakar padat memiliki bentuk padat. Sebagian besar bahan bakar padat menjadi sumber panas, contohnya: kayu dan batubara. Energi panas yang dihasilkan dari bahan bakar ini berubah menjadi uap yang kemudian menggerakkan peralatan dan menyediakan energi.

2. Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair merupakan bahan bakar yang memiliki sifat struktur tidak rapat. Bila dibandingkan dengan bahan bakar padat, molekul pada bahan bakar cair dapat bergerak bebas. Bensin, solar, dan minyak tanah adalah contoh dari bahan bakar cair yang biasa dipakai pada kendaraan, rumah tangga, dan industri. Minyak mentah jika disuling akan menghasilkan berbagai macam jenis bahan bakar cair, seperti bensin, minyak tanah/kerosen, solar, dan sebagainya.

3. Bahan Bakar Gas

Terdapat dua jenis bahan bakar gas yang biasa digunakan, yaitu *Compressed Natural Gas* (CNG) dan *Liquid Petroleum Gas* (LPG). CNG terdiri dari kandungan unsur metana, sementara LPG merupakan campuran dari unsur butana, propana dan bahan kimia lainnya. LPG banyak digunakan sebagai bahan bakar kompor pada rumah tangga, dan juga digunakan sebagai bahan bakar kendaraan bermotor yang menggunakan gas sebagai energinya.

2.12 Rasio Udara Bahan Bakar (*Air Fuel Rasio*)

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. kebutuhan udara dan bahan dinyatakan dengan rasio campuran udara bahan bakar AFR (*Air Fuel Ratio*). Rasio udara bahan bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR) adalah rasio massa udara terhadap bahan bakar padat, cair, atau gas yang ada dalam proses pembakaran. 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 perbandingan jumlah massa udara dengan jumlah massa bahan bakar. Rumus $AFR_{stoikiometri}$ dapat dilihat sebagai berikut :

$$AFR_{stoikiometri} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

Keterangan :

$AFR_{stoikiometri}$ = Rasio udara dan bahan bakar dalam keadaan stoikiometri

m_{air} = Jumlah mol udara

m_{fuel} = Jumlah mol bahan bakar

Udara *Excess Air* dan O₂ optimum pada gas buang berbagai bahan bakar memiliki persentase dan standar yang berbeda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 *Excess Air* dan O₂ optimum pada gas buang berbagai Bahan Bakar

| Bahan Bakar | Optimum <i>Excess Air</i> % | Optimum O ₂ pada Stack Gas % |
|---------------|-----------------------------|---|
| Batubara | 20 - 25 | 4 - 4,5 |
| Biomassa | 20 - 40 | 4 - 6 |
| Stoker firing | 25 - 40 | 4,5 - 6,5 |
| Solar | 5 - 20 | 1 - 3 |
| Gas Bumi/ LPG | 5 - 10 | 1 - 2 |
| Black Liquor | 5 - 10 | 1 - 2 |

(Sumber :The Engineering ToolBox,2003)

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

2.13 Level Ketinggian Air

Level ketinggian air pada *boiler* mengindikasikan volume air yang terisi di dalam *drum*. *Pressure steam* yang dihasilkan *boiler* dikendalikan dengan menjaga kestabilan level air yang masuk ke *boiler*. Jika terlalu banyak air di *boiler* maka *steam* yang dihasilkan tidak maksimal menyebabkan adanya kandungan air pada *steam* dan temperatur keluaran *boiler* turun, sedangkan jika air di *boiler* terlalu sedikit menyebabkan *steam* kering dan temperatur keluaran *boiler* naik sehingga dalam keadaan darurat perlu untuk menurunkan *pressure* dengan membuang *steam* melalui *drain* atau *safety valve* hingga kebutuhan proses tetap terpenuhi. (Decy Natalian dkk, 2012).

Pengaruh ketinggian level air pada *drum boiler* terhadap variabel lainnya, yaitu:

1. Level ketinggian air dipengaruhi oleh temperatur gas sebagai bahan bakar yang masuk ke pipa pada *boiler*. Jika temperatur tinggi akan menyebabkan proses penguapan air pada *drum boiler* semakin tinggi
2. Level ketinggian air yang tinggi akan menyebabkan *steam* yang dihasilkan mengandung uap air, jika level terlalu rendah maka akan menghasilkan *steam* yang terlalu kering dan akan menyebabkan kerusakan pipa-pipa pada *boiler*
3. Level ketinggian air yang terlalu rendah dapat menyebabkan *drum boiler* akan rusak karena terlalu panas
4. Level ketinggian air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pemisahan uap tidak berfungsi dengan baik, kontrol suhu akan sulit dan pipa *steam* dan *superheater* bisa rusak oleh kelembaban atau akumulasi kimia pengolahan air.

Level ketinggian air di dalam *drum boiler* dapat diketahui melalui instrumen *water level gauge*. Jenis *water level gauge* yang dapat digunakan yaitu *reflex glass* dengan mengetahui level air dari tabung kaca.

2.14 Efisiensi Termal Boiler

Efisiensi *boiler* adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara supply energi masuk ke dalam *boiler* dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh *boiler*. Efisiensi pembakaran boiler secara umum menjelaskan kemampuan sebuah *burner* untuk membakar keseluruhan bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar (*furnace*) *boiler*. Efisiensi *boiler* dihitung dari jumlah bahan bakar yang tidak terbakar bersamaan dengan jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*). Pembakaran *boiler* dapat dikatakan efisien apabila tidak ada bahan bakar yang tersisa di ujung keluaran ruang bakar *boiler*, begitu pula dengan jumlah udara sisa.

Untuk mendapatkan efisiensi pembakaran yang tinggi, *burner* dan ruang bakar *boiler* harus didesain seoptimum mungkin. Di sisi lain perbedaan penggunaan jenis bahan bakar juga mempengaruhi efisiensi pembakaran. Diketahui bahwa bahan bakar cair (seperti solar dan residu) dan gas (seperti LNG dan LPG) menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi jika dibandingkan bahan bakar padat seperti batubara.

Satu-satunya yang sulit dari efisiensi pembakaran adalah bagaimana mengejar angka yang paling optimal. Efisiensi pembakaran ditandai dengan terbakarnya keseluruhan bahan bakar di ruang bakar. Sedangkan parameter kontrol yang digunakan untuk memastikan keseluruhan bahan bakar tersebut adalah jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*) yang keluar melalui *stack*. Semakin banyak jumlah *excess air* yang keluar melewati cerobong asap, maka semakin kecil pula kemungkinan jumlah bahan bakar yang belum terbakar bisa melewati cerobong asap. Namun juga, semakin banyak jumlah *excess air* yang lolos melewati cerobong asap, jumlah energi panas yang lolos terbawa oleh udara sisa tersebut juga semakin banyak. Maka dari itu ada angka optimum dari besaran *excess air*, sehingga didapatkan efisiensi pembakaran *boiler* yang paling optimal.

Dikenal ada dua metode untuk menghitung efisiensi bahan bakar pada *boiler*, yaitu metode langsung dan metode tak langsung. Metode langsung atau dikenal juga sebagai metode *input-output*, dilakukan dengan jalan membandingkan secara langsung energi panas yang diserap oleh air sehingga berubah fase menjadi uap air (energi *output*), dengan energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar *boiler* (energi *input*).

Efisiensi ketel uap dinyatakan sebagai perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pembentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam dapur. Untuk mengetahui kinerja sebuah *boiler* tidak cukup hanya dengan mengetahui efisiensinya saja. Dengan mengetahui efisiensi *boiler* saja kita hanya dapat menyatakan bahwa ketel yang dievaluasi masih dapat bekerja dengan baik atau tidak, atau dapat juga dikatakan jika *boiler* mengalami penurunan efisiensi, masih dalam batas kewajaran atau tidak. Jadi jelas bahwa efisiensi menunjukkan kemampuan untuk menyerap panas dari hasil pembakaran.

Rumusan sederhana dari perhitungan metode langsung adalah sebagai berikut:

$$\eta_{fuel} = \frac{Q_{steam}}{Q_{fuel}} \times 100\%$$

$$\eta_{fuel} = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times GCV} \times 100\%$$

(Sugiharto Agus, 2020, PPSDM MIGAS, Cepu)

Dimana:

- η_{fuel} : Efisiensi bahan bakar *boiler* (%)
- Q_{steam} : Energi panas total yang diserap uap air (kalori; Joule)
- Q : Debit uap air keluar *boiler* (kg/jam)
- h_g : Entalpi uap keluar *boiler* (Kcal/kg)
- h_f : Entalpi air masuk *boiler* (kcal/kg)
- Q_{fuel} : Energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar (kalori; Joule)
- q : Debit kebutuhan bahan bakar (kg/jam)
- GCV : *Gross Calorific Value* atau nilai kalor spesifik bahan bakar (kcal/kg)