

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler adalah alat penukar panas pada bejana yang tertutup dimana panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar dipindahkan ke air umpan untuk menghasilkan uap (*steam*). Untuk perpindahan panas yang efektif, unit perpindahan panas diatur dengan cara yang berbeda. Kebutuhan uap (*steam*) bertekanan tinggi dan suhu tinggi di pembangkit listrik saat ini untuk menggerakkan turbin telah membuat desain *boiler* menjadi rumit. *Boiler* berkapasitas tinggi dioperasikan diatas rentang tekanan kritis (221,2 bar). (Ranjan Amiya.2014).

Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air didalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (MF Syahputra.2010).

Sistem *boiler* terdiri dari : sistem air umpan (*Feed Water*), sistem uap (*steam*) dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan (*feed water*) menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan uap (*steam*). Uap (*steam*) dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan uap (*steam*) diatur menggunakan *valve* dan dipantau dengan alat ukur tekanan (*pressure indicator*). 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 (MF Syahputra.2010).

2.1.1 Jenis Boiler

Berdasarkan klasifikasi *boiler* secara umum terbagi menjadi 2 jenis yaitu :

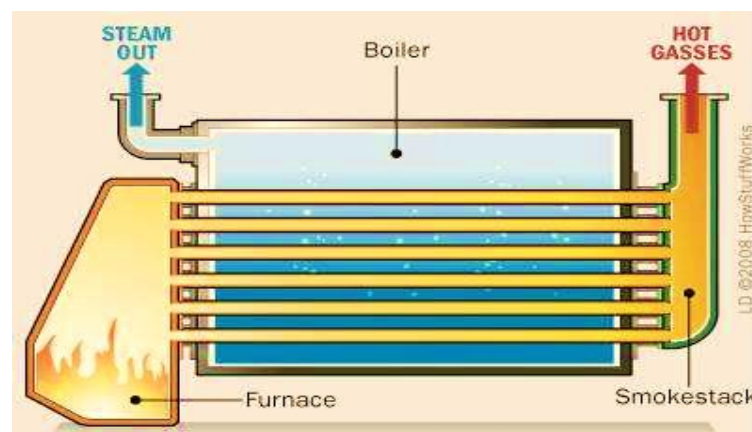
1. Fire tube boiler

Fire tube boiler digunakan untuk menghasilkan uap (*steam*) sejak akhir abad ke-18 di pabrik industri untuk menghasilkan uap (*steam*) dibawah 1,8 Mpa (250psig).kapasitas pada tipe ini dibatasi hingga 6,3kg/s (50.000 lb/jam). *Fire*

tube boiler adalah bentuk dari *boiler* jenis cangkang, gas panas yang melewati pipa-pipa dan air umpan *boiler* ada di dalam *shell* untuk dirubah menjadi *steam*, biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* yang relative kecil dengan tekanan *steam* rendah.(Kiameh Philip.2012). pada jenis *boiler fire tube boiler* pada **Gambar 2.1** adalah tekanan uap tidak dapat dibuat terlampau tinggi karena ketebalan *drum* akan sedemikian tebalnya sehingga tidak menguntungkan. *Boiler* seperti ini banyak digunakan di pabrik tahu karena tidak memerlukan tekanan uap yang tinggi.

Faktor yang mendasari pemilihan jenis *boiler* sebagai berikut :

- a. Kapasitas yang digunakan
- b. Kondisi *steam* yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan
- d. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi



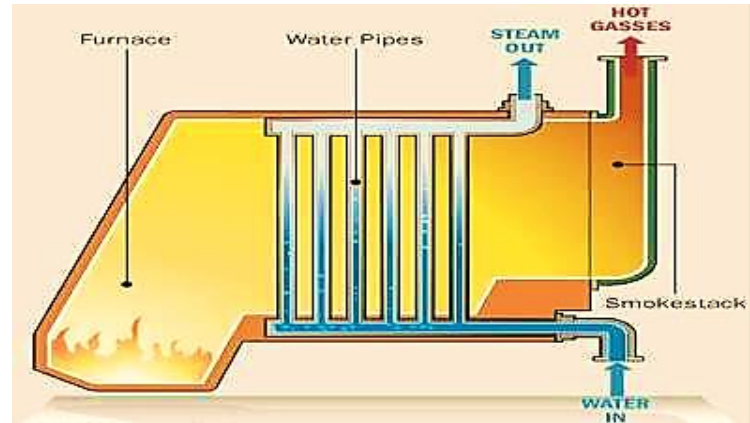
Gambar 2.1 *Fire Tube Boiler*

Sumber : Faizal, dkk. 2009

2. *Water Tube Boiler*

Water Tube Boiler pada **Gambar 2.2** air umpan *boiler* berada didalam pipa mengalir masuk ke dalam *drum* air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam *drum*, *boiler* ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus *boiler* untuk pembangkit tenaga. *Water Tube Boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas *steam* antara 4.500 – 12.00 kg/jam dengan tekanan sangat tinggi (UNEP, 2006).

Apabila kapasitas *boiler* lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi lebih besar dari 24 bar, maka *boiler* dianggap cocok untuk memproduksi uap dalam jumlah besar dengan skala industry yang dihasilkan yaitu *Superhated*. (Dalimuthe, 2006).



Gambar 2.2 *Water Tube Boiler*

Sumber : Faizal, dkk. 2009

2.1.2 Fungsi Boiler

Fungsi dari *boiler* adalah menghasilkan uap (*steam*) yang digunakan untuk kebutuhan proses pabrik, sebagai pembangkit listrik untuk kebutuhan pabrik maupun perumahan karyawan disekitar pabrik. Cara menghasilkan listrik dari *boiler* yaitu menghubungkan *boiler* dengan turbin atau generator yang berfungsi merubah energi potensial menjadi energi listrik. Adanya pengaruh pengotoran yang ditimbulkan dari bahan bakar maupun air umpan (*feed water*) sangat berpengaruh terhadap efisiensi *boiler* (Asmudi.2016).

2.1.3 Komponen pada Boiler

Adapun komponen yang menyusun *boiler* sebagai berikut :

- a. *Furnace*
- b. *Steam drum*
- c. *Water drum*
- d. *Water tube*
- e. *Water level gauge*
- f. *Superheater*

- g. *Temperature indicator*
- h. *Pressure indicator*
- i. Pompa
- j. Kompresor
- k. Burner

2.1.3 Syarat air umpan boiler

Pada pengujian atau proses *running* alat boiler membutuhkan air umpan boiler untuk menghasilkan *steam* yang berkualitas, maka diperlukan dan harus memenuhi persyaratan tertentu seperti kesadahan total air, Ph, alkalinitas, dan silica. Air umpan boiler yang digunakan harus dapat dipastikan memenuhi persyaratan sebagai sumber uap dan dapat menghindari terjadinya korosi pada pipa. Oleh karena itu diperlukan upaya untuk menjaga kestabilan air umpan boiler dengan menganalisa kesadahan total agar sesuai standar.

Penentuan Kesadahan Total

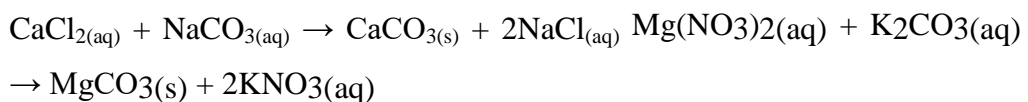
Prosedur analisis penentuan kesadahan total pada air umpan boiler ialah mula-mula dimasukkan air umpan boiler sebanyak 25 mL ke dalam gelas ukur lalu dimasukkan kedalam erlenmeyer. Selanjutnya dimasukkan indikator *hydro 733* sebanyak 1 gram dan lihat perubahan yang terjadi menjadi berwarna biru tua. Jika tidak berubah menjadi warna ungu muda maka dititrasi dengan EDTA. Kesadahan adalah suatu keadaan dimana terdapat kandungan kapur yang berlebihan di dalam air. Pada dasarnya prinsip dari kesadahan ialah terkontaminasinya air dengan unsur logam seperti kalsium (Ca) dan magnesium (Mg). Air permukaan umumnya kandungan Ca dan Mg dalam kadar yang tinggi berkisar (>200 ppm) CaCO_3 . Pada daerah batuan kapur air akan memiliki tingkat kesadahan yang tinggi. Kesadahan dalam air bersumber dari adanya kontak dengan tanah dan pembentukan batuan. Kesadahan total dapat disebabkan oleh adanya ion seperti kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) secara bersama-sama. Kesadahan air dapat menyebabkan kinerja menjadi tidak efektif. Kesadahan air dapat diklasifikasikan dalam beberapa tingkat yaitu: kesadahan <50 mg/L (air lunak), 50-150 mg/L (air menengah), 150-300 mg/L (air sadah), dan >300

mg/L (air sangat sadah).

Air sadah dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, diantaranya air sadah sementara dan air sadah tetap. Air sadah sementara mengandung ion bikarbonat (HCO_3^-) baik dalam bentuk senyawa kalsium bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) maupun dalam bentuk senyawa magnesium bikarbonat ($\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$). Air sadah sementara diartikan sebagai air yang sifat kesadahanannya dapat hilang dengan proses pemanasan. Proses pemanasan air sadah tersebut akan menghasilkan endapan sesuai persamaan reaksi berikut:



Air sadah tetap merupakan air sadah yang mengandung ion nitrat (NO_3^-), klorida (Cl_4^-), dan sulfat (SO_4^{2-}) baik dalam bentuk senyawa kalsium nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), kalsium klorida (CaCl_2), kalsium sulfat (CaSO_4) atau senyawa magnesium sulfat (MgSO_4). Adanya senyawa-senyawa tersebut dalam air akan menyebabkan kesadahan tetap karena proses pemanasan tidak dapat menghilangkan sifat kesadahan. Kesadahan tetap dapat dihilangkan dengan penambahan pengendap seperti larutan natrium karbonat (Na_2CO_3) atau kalium karbonat (K_2CO_3). Ion karbonat akan bereaksi dengan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} seperti yang ditunjukkan pada reaksi berikut,



Pengujian kesadahan total dapat dilakukan menggunakan larutan amoniak dan *hydro 733*. Adapun tujuan penggunaan larutan amoniak adalah untuk menjaga pH supaya tetap dalam suasana basa. Penggunaan indikator *hydro 733* akan menghasilkan warna biru jika kesadahan total berada pada nilai *trace* (<5 mg/L). Namun jika tidak menghasilkan warna biru maka kesadahan total dianalisis dengan metode titrasi kompleksometri menggunakan EDTA. EDTA berfungsi sebagai pengompleks ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Titik akhir titrasi terjadi ketika seluruh ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} sudah terikat oleh senyawa EDTA. Titik akhir titrasi ditandai dengan perubahan warna merah anggur menjadi warna biru. Metode ini sering digunakan karena mudah dalam menentukan titik akhir titrasi. Prinsip dari kompleksometri

yaitu pembentukan ion-ion kompleks dalam larutan [5].

Nilai standar kesadahan total untuk air umpan *boiler* adalah 5 mg/L. Apabila kesadahan total pada air umpan *boiler* lebih dari 5 mg/L maka akan menyebabkan terbentuknya kerak pada *boiler* yang disebabkan oleh adanya pengendapan. Jika pada *boiler* terdapat lapisan kerak

2.1.4 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 disbanding dengan air yang lebih dingin. Sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (Djokosetyardjo, 1990).

Sistem *boiler* terdiri dari sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai kebutuhan uapnya, sistem *steam* mengumpulkan semua alat yang digunakan dalam menyediakan bahan bakar agar menghasilkan panas yang dibutuhkan. Prinsip kerja *boiler* yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi energi yang dimiliki uap air.

Berdasarkan bahan bakar yang digunakan, *boiler* dapat diklasifikasikan menjadi *boiler* bahan bakar padat, *boiler* bahan bakar cair, dan *boiler* bahan bakar gas. Pemanasan ruang juga merupakan salah satu aplikasi dari *boiler*. Prinsip kerja pemanasan ruangan dikembangkan berdasarkan Hukum Termodinamika I dan II.

Perpindahan panas pada kasus pemanas ruangan adalah memindahkan energy dalam bentuk panas dari suatu titik yang bersuhu tinggi ke titik yang bersuhu lebih rendah (Djojodihardjo, 1985). Untuk menghangatkan ruangan dibutuhkan suatu fluida (air, udara atau udara) yang dipanaskan di dalam *boiler*, dialirkan melalui pipa, menuju radiator yang berhubungan langsung dengan udara ruangan, fluida akan mengalir kembali lagi ke *boiler* untuk dipanaskan kembali.

2.2 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 alternative, pembangkit listrik sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi (Sutini Pujiastuti Lestari. 2011).

2.2.1 Hukum Termodinamika I

Hukum termodinamika pertama dikenal dengan prinsip konversi energi yang menyatakan bahwa energi itu lestari. Energy 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 yang lain secara bersama-sama (Astu dkk,2013).

2.2.2 Hukum Termodinamika II

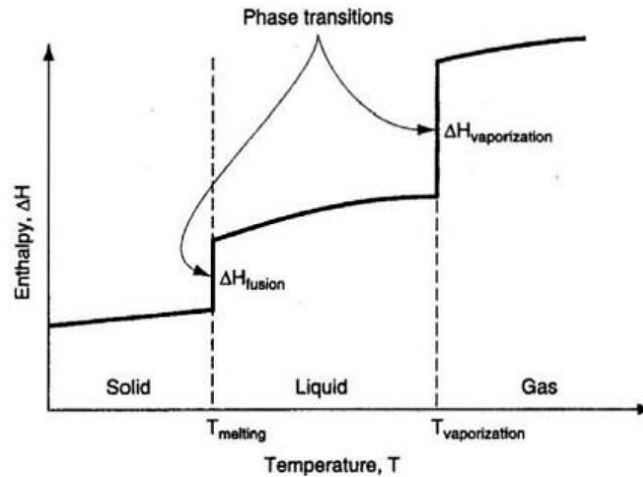
Hukum Termodinamika kedua dinyatakan dengan entropi. pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu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

$$\Delta S_{tot} \geq 0$$

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidk teraturan perilaku partikel dalam sistem. Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kimpleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa :

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

sensibel. Berikut hubungan temperatur terhadap entalpi dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.

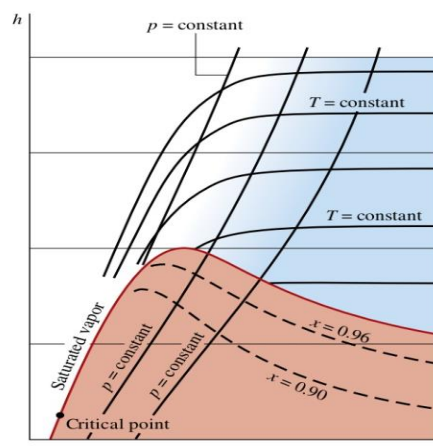


Gambar 2.4 Diagram Temperatur dan Entalpi

Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro. 2006

2.2.4 Hubungan Entalpi – Entropi

Entropi adalah sifat keadaan sistem yang menyatakan tingkat ketidakteraturan. Entropi juga dapat didefinisikan sebagai kecenderungan sistem untuk berproses ke arah tertentu. Entropi dapat dihasilkan, tetapi tidak dapat dimusnahkan. Hubungan antara entalpi-entropi ditunjukkan oleh diagram $h-s$ atau disebut juga dengan diagram Mollier yang terlihat pada **Gambar 2.5**.



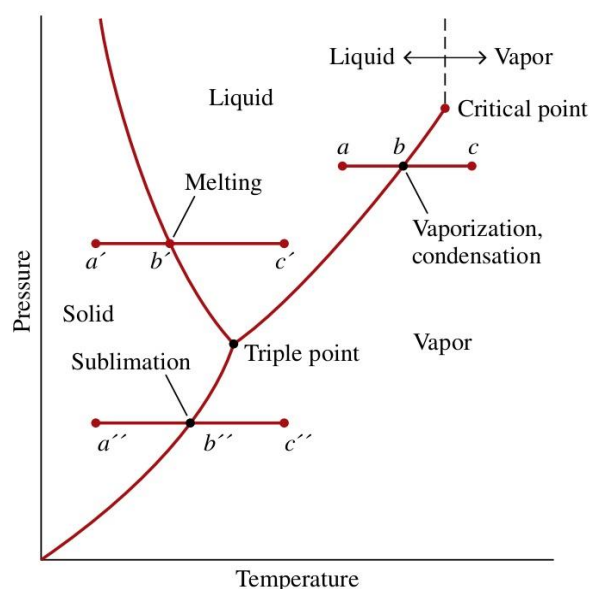
Gambar 2.5 Diagram Entalpi dan Entropi

Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro. 2006

Garis-garis kualitas konstan ditunjukkan pada daerah campuran fase cair-uap. Grafik ini digunakan untuk mendapatkan nilai sifat pada keadaan uap panas lanjut dan untuk campuran dua fase cair-uap. Data cairan umumnya jarang tersedia. Pada daerah uap panas lanjut, garis temperatur konstan mendekati horizontal pada saat tekanan berkurang yang ditunjukkan pada daerah tearsir pada **Gambar 2.5** (Moran & Shapiro, 2006).

2.2.5 Diagram Fase Air

Diagram fase adalah sebuah diagram yang menunjukkan perubahan-perubahan fase fisika dari suatu zat pada berbagai kondisi temperatur dan tekanan. Maka diagram fase air adalah sebuah diagram tekanan-temperatur yang menunjukkan perubahan-perubahan fisika air pada berbagai kondisi.



Gambar 2.6 Diagram Fase Air

Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro. 2006

Pada diagram fase air tersebut, terbentuk tiga buah kurva yang menjadi batas antara tiga fase fisika air. Kurva pertama menunjukkan batas antara fase padat dengan fase gas, kurva kedua menjadi batas antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva ketiga menjadi batas antara fase cair dengan gas. Khusus kurva ketiga ini disebut dengan istilah *saturated line* (garis saturasi). Garis saturasi memiliki fase yang dikenal dengan nama uap saturasi. Di sepanjang garis saturasi,

berapapun besar tekanan dan temperatur, air dan uap air dapat berada di dalam satu kondisi yang sama dengan perbandingan kuantitas sesuai dengan nilai entalpi yang dikandungnya.

Tiga kurva yang membentuk diagram fase air kemudian bertemu di sebuah titik yang dikenal sebagai *triple point*. *Triple point* Kondisi ini berada pada tekanan 0,61 kPa dan temperatur 0,010°C. Nampak pada diagram di atas, di bawah *triple point*, air tidak memiliki fase cair. Di bawah *triple point* ini padatan air (es) akan langsung menguap menjadi gas jika terjadi kenaikan temperatur pada tekanan konstan.

Di atas *triple point*, terdapat dua percabangan kurva dengan fungsi masing-masing. Satu kurva membatasi antara fase padat dengan cair, sedangkan kurva lainnya membatasi antara fase cair dengan gas. Di ujung kurva saturasi ini terdapat satu titik yang disebut sebagai *critical point*. *Critical point* adalah sebuah titik yang menjadi batas akhir dari kurva ekuilibrium fase cair dan gas sehingga dapat berada pada satu kondisi tekanan dan temperatur yang sama. *Critical point* air berada pada tekanan 22,1 MPa dan temperatur 374°C.

2.3 Uap (*Steam*)

Keadaan uap tergantung dari tekanan, oleh karena itu pembentukan uap diadakan pada tekanan konstan. Bila 1 kg air dipanaskan dengan temperatur mula 0°C di dalam tangki tertutup dengan tekanan konstan, pada pemanasan tingkat pertama temperatur air akan naik sampai air mendidih dan dikenal sebagai temperatur didih. Setelah temperatur didih dicapai, uap mulai terbentuk selama temperatur dipertahankan konstan, sampai dicapai titik di mana semua air berubah menjadi uap. Isi tangki akan berupa campuran air dan uap yang disebut sebagai uap basah. Dan bila semua air termasuk butir-butir yang terapung dalam uap basah itu diuapkan dan pemanasan dilanjutkan temperatur uap basah itu naik dan uap ini dikenal sebagai uap kering (Vitri dan Toni, 2013).

Steam atau uap air adalah sejenis fluida yang mengalami perubahan fase dari air ke gas, bila mengalami pemanasan sampai temperatur didih di bawah tekanan tertentu. Uap air terbentuk dalam tiga jenis, yaitu uap saturasi (*saturated*

steam), uap saturasi kering (*superheated steam*), uap superkritis (*supercritical steam*).

a) **Uap Saturasi** (*Saturated Steam*)

Uap saturasi adalah sebuah kondisi dimana uap air berada dalam satu kondisi ekuilibrium tekanan dan temperatur dengan air fase *liquid* (cair). Dengan kata lain, uap saturasi merupakan uap yang masih basah, yang masih tercampur dengan molekul-molekul air berfase cair.

b) **Uap Panas Lanjut** (*Superheated Steam*)

Uap panas lanjut adalah sebuah fase air yang telah melewati fase saturasi dengan menyerap lebih banyak energi panas, sehingga keseluruhan fluida air sudah memiliki fase gas murni.

c) **Uap Superkritis** (*Supercritical Steam*)

Uap superkritis adalah sebuah fase air yang berada dalam kondisi di atas titik kritis air yakni tekanan 22,1 MPa dan temperatur 374°C.

2.4 Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Oksigen (O₂) merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20.9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah ke bentuk gas sebelum dibakar. Biasanya diperlukan panas untuk mengubah cairan atau padatan menjadi gas. Bahan bakar gas akan terbakar pada keadaan normal jika terdapat udara yang cukup. Hampir 79% udara (tanpa adanya oksigen) merupakan nitrogen, dan sisanya merupakan elemen lainnya. Nitrogen dianggap sebagai pengencer yang menurunkan suhu yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran (UNEP, 2006).

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

- a. T- Temperatur. Temperatur yang digunakan untuk pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia.

- b. T- Turbulensi. Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi.
- c. T- Time. Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia (UNEP, 2006).

Jumlah udara yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran sempurna disebut sebagai jumlah udara teoritis (stoikiometrik). Akan tetapi pada kenyataannya untuk pembakaran sempurna jumlah udara yang dibutuhkan melebihi jumlah udara teoritis yang biasanya disebut sebagai *excess air*. Parameter yang paling sering digunakan untuk mengkuantifikasi jumlah udara dan bahan bakar pada proses pembakaran tertentu adalah rasio udara bahan bakar.

2.4.1 Rasio Udara Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio*)

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** dan **Gambar 2.7**.

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

Bahan Bakar	Optimum <i>Excess Air</i> %	<i>Optimum O₂</i> pada <i>Stack Gas</i> %
Batubara	20 - 30	4 - 4,5
Biomassa	20 - 40	4 - 6
Stoker firing	25 - 40	4,5 - 6,5
Solar	5 - 24	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.