

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Henan Kaifeng Sweet Boiler Co. Ltd China pada tahun 2016 memproduksi *water tube boiler* yang menggunakan dua buah drum yaitu *water drum* dan *steam drum* dengan efisiensi termal *boiler* mencapai 61%. Dua buah *drum* diletakkan secara berseberangan atau *cross section* yang dihubungkan oleh *water tube*. Kelebihan *boiler* ini ialah perpindahan panas yang terjadi dari *water tube* ke *steam drum* terjadi secara merata. Namun, *water tube* yang menghubungkan dua buah *drum* terpasang 90° tegak lurus terhadap permukaan mengakibatkan pergerakan molekul air dari *water drum* ke *steam drum* melawan gaya gravitasi sehingga laju penguapan terhambat. Boiler yang diproduksi perusahaan ini mempunyai konfigurasi yang mirip dengan boiler-boiler yang diteliti oleh para peneliti sebelumnya.



Gambar 2.1 Produk Boiler dari Henan Kaifeng Sweet Boiler Co. Ltd China

John R. English., dkk, (2019), telah melakukan penelitian terhadap paket boiler dengan sistem *double drum* terhubung bersama dengan *baffle* untuk mengoptimalkan perpindahan panas. Unit ini dibuat untuk menghasilkan operasi pada kapasitas lebih tinggi dan tekanan lebih tinggi daripada unit konvensional serta memiliki waktu respon yang cepat.

2.2 Definisi Boiler

Boiler merupakan suatu bejana yang didalamnya berisi air atau fluida lain untuk dipanaskan untuk menghasilkan uap bertekanan (Sugiharto 2020). Dimana tekanan dan temperature fluida yang dihasilkan tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam keperluan, seperti untuk turbin uap, pemanas ruangan, mesin uap, dan lain sebagainya (Hasibuan 2013). Uap yang dihasilkan dari *boiler* ini pada umumnya berasal dari proses pembakaran yang menggunakan bahan bakar gas, cair maupun bahan bakar padat (Sugiharto 2020).

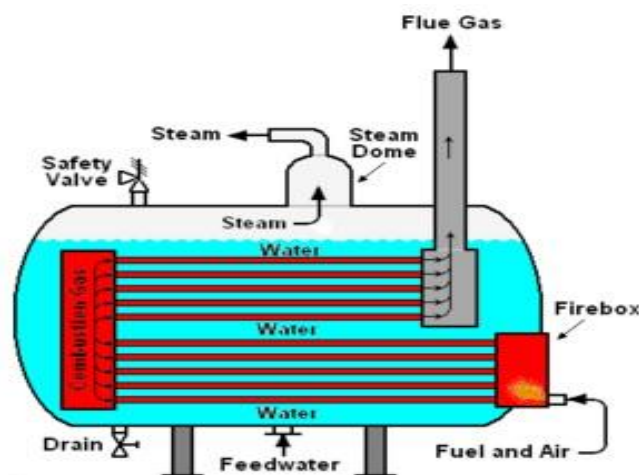
2.3 Jenis – Jenis Boiler

Berdasarkan tipe *tube*, boiler dibedakan menjadi dua, yakni :

A. Boiler Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler ini memiliki dua bagian didalamnya yaitu bagian pipa yang merupakan tempat terjadinya pembakaran dan bagian *barrel* yang berisi fluida. Tipe ini memiliki karakteristik yaitu menghasilkan jumlah *steam* yang rendah serta kapasitas yang terbatas.

Proses pengapian terjadi didalam pipa dan panas yang dihasilkan diantarkan langsung ke dalam boiler yang berisi air.



Gambar 2.2 Gambar *Fire Tube Boiler*

(Sumber : <http://pembangkit-uap.blogspot.com/2015/03/fire-tube-boiler-dan-water-tube-boiler.html>)

Proses pemasangan cukup mudah dan tidak memerlukan pengaturan yang khusus, tidak membutuhkan area yang besar dan memiliki biaya yang murah.

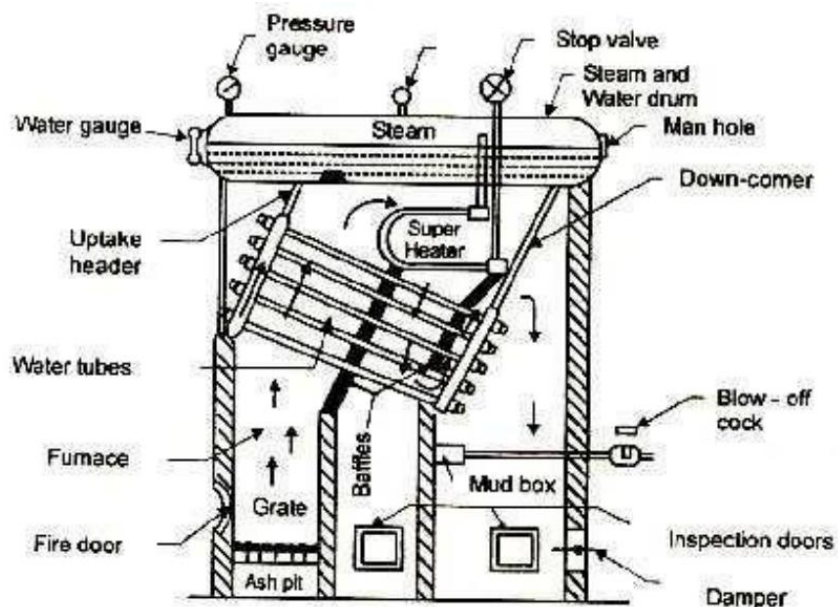
Namun memiliki tempat pembakaran yang sulit terjangkau saat hendak dibersihkan, kapasitas yang rendah dan kurang efisien karena banyak kalor yang terbuang sia – sia.

B. Boiler Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Boiler ini memiliki konstruksi yang hampir sama dengan jenis pipa api, jenis ini juga terdiri dari pipa dan *barrel*, yang membedakan hanya sisi pipa yang diisi oleh air sedangkan sisi *barrel* merupakan tempat terjadinya pembakaran.

Pada *boiler* pipa air, air umpan mengalir melalui bagian dalam pipa yang selanjutnya masuk ke dalam *drum*. Proses pengapian terjadi pada sisi luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa berisi air. *Steam* yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan didalam sebuah *steam drum* yang memiliki tekanan dan *temperature* tertentu yang dimana *steam* yang dihasilkan tersebut merupakan *saturated steam*. Kemudian *saturated steam* tersebut akan dipanaskan kembali pada *superheater* untuk menghasilkan *superheated steam* melalui pipa distribusi.

Memiliki kapasitas *steam* yang besar, nilai efisiensi relative lebih tinggi dan tungku pembakaran mudah untuk dijangkau saat akan dibersihkan. Namun, biaya investasi awal cukup mahal, membutuhkan area yang luas dan membutuhkan komponen tambahan dalam hal penanganan air.



Gambar 2.3 Gambar *Water Tube Boiler*

2.4 Prinsip Kerja Boiler

Prinsip kerja boiler yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi energi yang dimiliki uap air. 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 yang lebih tinggi akan turun ke dasar (Djokosetyardjo, 1990).

Sistem yang dimiliki boiler untuk memenuhi kebutuhan *steam* terbagi menjadi beberapa sistem, antara lain sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar (UNEP, 2006).

A. Sistem Air Umpan

Sistem air umpan merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam boiler.

B. Sistem *steam*

Sistem *ssteam* 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

Sistem bahan bakar merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.5 Komponen Boiler

Komponen *boiler* adalah seperangkat alat atau unit proses yang merupakan bagian dari *boiler*. Adapun komponen-komponen yang menyusun boiler adalah sebagai berikut:

A. *Furnace*

Furnace merupakan tempat terjadinya pembakaran bahan bakar yang menjadi sumber panas.

- B. *Steam drum*
Steam drum berfungsi sebagai reservoir campuran air umpan dan uap air yang terbentuk selama proses berlangsung serta memisahkan *saturated steam* yang akan diproses ke *superheater* dengan air yang akan kembali mengalir ke *water drum* melalui *blowdown tube*.
- C. *Water drum*
Water drum berfungsi sebagai tempat penampungan air umpan yang belum mengalami perubahan fase cair menjadi uap.
- D. *Water tube*
Water tube berfungsi sebagai tempat pemanasan air yang akan dikonversi menjadi *steam*.
- E. *Superheater*
Superheater merupakan rangkaian *tube* yang berfungsi untuk menyerap panas yang digunakan untuk mengkonversi *saturated steam* menjadi *superheated steam*.
- F. *Water level gauge*
Water level gauge berfungsi untuk mendeteksi ketinggian air di dalam *steam drum*.
- G. *Temperature indicator*
Temperature indicator berfungsi untuk mengukur suhu *steam* yang ada di dalam *steam drum*.
- H. *Pressure indicator*
Pressure indicator berfungsi untuk mengukur tekanan *steam* yang dihasilkan di dalam *steam drum*.
- I. Pompa
Pompa berfungsi mengalirkan air umpan ke dalam *boiler*.
- J. Kompresor
Kompresor berfungsi menyuplai udara primer untuk pembakaran pada *burner*.
- K. Burner
Burner berfungsi untuk menghasilkan api yang digunakan dalam proses pembakaran di ruang bakar

2.6 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.

2.6.1 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika Pertama menyatakan bahwa energi itu lestari. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Hukum Termodinamika Pertama 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 & Djati, 2013).

2.6.2 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.

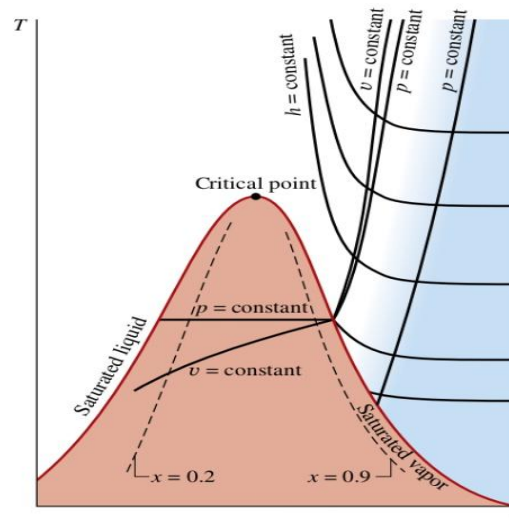
$$\Delta S_{\text{tot}} \geq 0$$

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. 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. Ketidaksamaan Clausius menyatakan bahwa :

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

Di mana 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).



Gambar 2.4 Diagram Temperatur dan Entropi

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

Contoh :

Fluida yang telah tercapai titik saturasinya, kemudian dipanaskan kembali. Temperatur akhir uap panas lanjut tersebut sebesar 200°C dengan tekanan 3 bar. Hitunglah nilai entropinya.

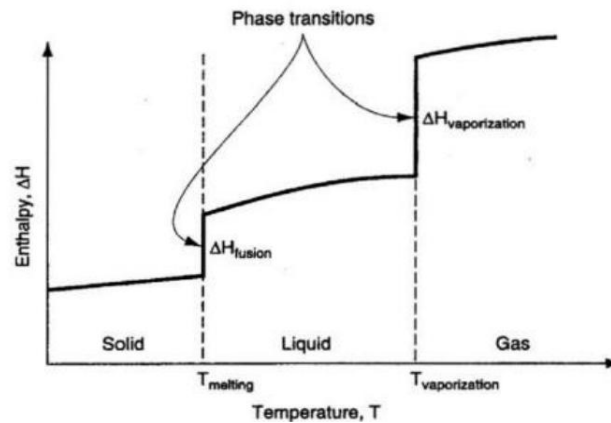
	$p = 1.5 \text{ bar} = 0.15 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 111.37^{\circ}\text{C}$)				$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133.55^{\circ}\text{C}$)			
	T (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	h (kJ/kg)
Sat.	1.159	2519.7	2693.6	7.2233	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
120	1.188	2533.3	2711.4	7.2693				
160	1.317	2595.2	2792.8	7.4665	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
200	1.444	2656.2	2872.9	7.6433	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
240	1.570	2717.2	2952.7	7.8052	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
280	1.695	2778.6	3032.8	7.9555	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
320	1.819	2840.6	3113.5	8.0964	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
360	1.943	2903.5	3195.0	8.2293	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
400	2.067	2967.3	3277.4	8.3555	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
440	2.191	3032.1	3360.7	8.4757	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
500	2.376	3131.2	3487.6	8.6466	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
600	2.685	3301.7	3704.3	8.9101	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

Berdasarkan tabel uap air panas lanjut, maka untuk mendapatkan nilai entropi pada suhu $T = 200^{\circ}\text{C}$ dan $P = 3 \text{ bar}$, nilai entropi (S) yaitu $7,3115 \text{ KJ/Kg.K}$.

2.6.3 Entalpi

Entalpi adalah energi yang terkandung dalam sistem pada keadaan tekanan konstan. Dalam persamaan energi untuk kedua proses aliran dan non-aliran dapat terlihat bahwa istilah $(U+pV)$ berulang kali terjadi. Istilah ini dinamakan entalpi dengan simbol H . Dalam sistem aliran simbol pV merupakan aliran energi, tetapi dalam sebuah sistem non-aliran merupakan tekanan dan volume, memiliki satuan energi tetapi tidak mewakili energi.

Perubahan entalpi terjadi dari fasa padat ke cair hingga menjadi gas dan sebaliknya. Pada proses perubahan entalpi yang terjadi pada temperatur tetap disebut panas laten. Perubahan entalpi pada fasa yang sama disebut panas sensibel. Hubungan temperatur terhadap entalpi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.5 Diagram Temperatur-Entalpi

Contoh :

Tentukan entalpi air dalam fasa liquid pada suhu 307 K dan 500 kPa dan air dalam fasa liquid pada suhu dengan persamaan !

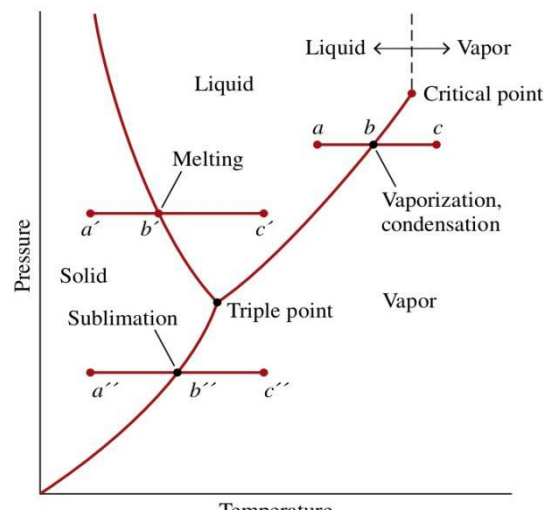
T K	Press. kPa	Volume, m ³ /kg		Enthalpy, kJ/kg		
		V _l	V _g	H _l	H _{vap}	H _g
273.16	0.6113	0.001000	206.1	0.0	2500.9	2500.9
275	0.6980	0.001000	181.7	7.5	2496.8	2504.3
280	0.9912	0.001000	130.3	28.1	2485.4	2513.5
285	1.388	0.001001	94.67	48.8	2473.9	2522.7
290	1.919	0.001001	69.67	69.7	2462.2	2531.9
295	2.620	0.001002	51.90	90.7	2450.3	2541.0
300	3.536	0.001004	39.10	111.7	2438.4	2550.1
305	4.718	0.001005	29.78	132.8	2426.3	2559.1
310	6.230	0.001007	22.91	153.9	2414.3	2568.2
315	8.143	0.001009	17.80	175.1	2402.0	2577.1
320	10.54	0.001011	13.96	196.2	2389.8	2586.0

Berdasarkan tabel, maka untuk mendapatkan nilai entalpi pada suhu $T = 307$ K dilakukan interpolasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} H_{307} &= H_{305} + \frac{H_{307} - H_{305}}{H_{310} - H_{305}} (H_{307} - H_{305}) = 2559.1 + \frac{2568.2 - 2559.1}{310 - 305} \\ &= (307 - 305) = 2557.5 \end{aligned}$$

2.7 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

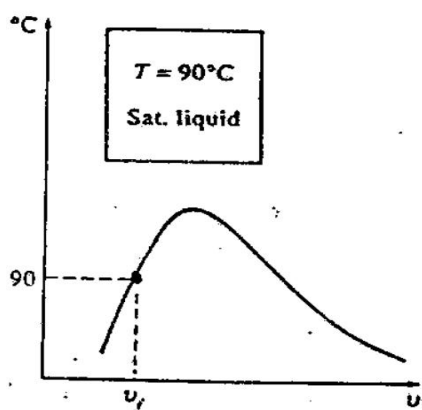
Sumber : Michael J. Moran dan Howard N. Shapiro, 2006

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* merupakan sebuah titik di

mana tiga fase fisika air yaitu padat, cair, dan gas, dapat berada di satu kondisi ekuilibrium. 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.



Contoh : Sebuah tangki berisi 50 kg air (dalam bentuk cairan jenuh/saturated liquid) pada suhu 90°C. Hitunglah tekanan dalam tangki dan volume tangkinya?

Keadaan cair sat-liq ditunjukkan pada diagram karena kondisi saturasi ada dalam tangki, maka tekanan harus tekanan saturasi pada 90°C.

Berdasarkan tabel,

$$P = P_{\text{sat}} \text{ pada } 90^\circ\text{C} = 70,14 \text{ kPa}$$

$$\text{Volume Spesifik cairan jenuh pada } 90^\circ\text{C } v = v_f \text{ pada } 90^\circ\text{C} = 0,001036 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Volume total tangki } V = m \cdot v$$

$$= (50)(0,001036)$$

$$= 0,0918 \text{ m}^3$$

2.7.1 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.

2.8 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 minimum 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.

2.8.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

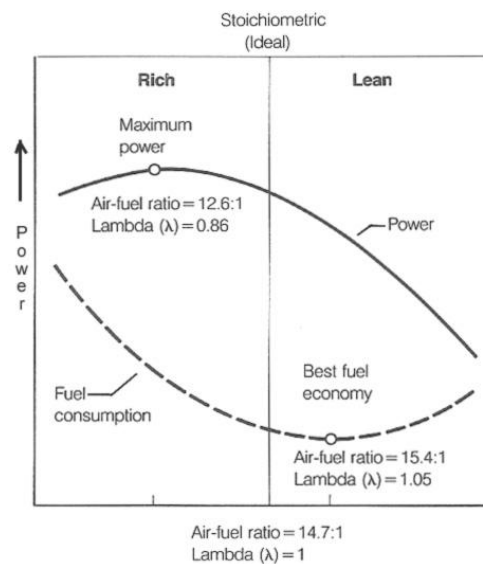
Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. kebutuhan udara dan bahan dinyatakan dengan rasio campuran udara dan bahan bakar AFR (*Air Fuel Ratio*).

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.

$$AFR = \frac{m_a}{m_f}$$

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.

AFR sangat berpengaruh terhadap panjang nyala api. Panjang nyala api berkebalikan dengan AFR yakni AFR meningkat maka panjang nyala api menurun. Hal ini juga sesuai dengan persamaan panjang nyala api yang diusulkan oleh Rokke. Persamaan Rokke menunjukkan korelasi antara panjang nyala yang sebanding dengan fraksi massa bahan bakar. Semakin turun nilai AFR berarti fraksi massa bahan bakar semakin tinggi sehingga panjang nyala api juga meningkat dan bahan bakar semakin banyak yang tidak terbakar.



Gambar 2.7 Grafik Stoikiometrik Rasio Udara Bahan Bakar

Contoh :

Untuk terjadi suatu pembakaran harus ada bahan bakar (H/C), oksigen dan suhu lingkungan dari campuran tersebut.

- Hidrokarbon diperoleh dari bahan bakar fosil.

- Oksigen diperoleh dari udara, dengan komposisi :

$$\text{O}_2 = 20.99 \%$$

$$\text{N}_2 = 78.03 \%$$

$$\text{Ar}_2 = 0.94 \%$$

$$\text{CO}_2 = 0.03 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0.01 \%$$

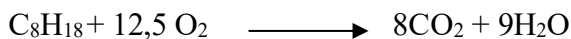
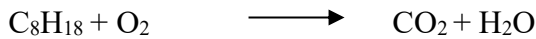
Untuk memudahkan perhitungan, dibulatkan : $\text{O}_2 = 21 \%$ dan $\text{N}_2 = 79 \%$.

- BM udara = 28.967 kg udara/k.mol = 29 kg udara/k.mol.

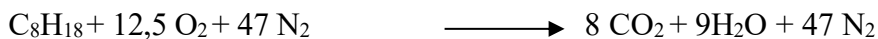
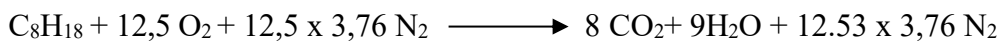
- Untuk 1 k.mol udara = $79/21 = 3.76$ k.mol N_2 yang ikut.

Selanjutnya perhitungan dapat dilakukan sbb :

1. Bahan Bakar Minyak dan Gas.



Pembakaran dengan udara:



- Masa udara (m_a) :

$$m_a = (12,5 + 47) \text{ kmol udara} \times 29 \text{ kg udara/kmol udara}$$

$$m_a = 1.725,5 \text{ kg udara}$$

- Masa bahan bakar (m_f) :

$$m_f = 1 \text{ k.mol} \times (8 \times 12 + 18 \times 1) \text{ kg bb/kmol}$$

$$m_f = 114 \text{ kg bb}$$

Jadi :

$$\text{AFR} = \frac{m_a}{m_f} = \frac{1.725,5 \text{ kg udara}}{114 \text{ kg bb}} = 15 : 1$$

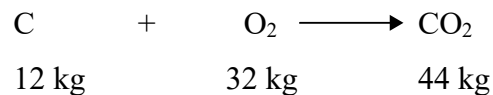
2.8.2 Kebutuhan Udara Teoritis

Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara:

- berdasarkan pada satuan berat
- berdasarkan pada satuan volume.

Pada suatu analisis pembakaran selalu diperlukan data-data berat molekul dan berat atom dari unsur-unsur yang terkandung dalam bahan bakar.

A. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat



Ini berarti bahwa setiap massa karbon memerlukan 32 kg oksigen secara teoritis untuk membakar sempurna karbon menjadi karbondioksida. Apabila oksigen yang dibutuhkan untuk membakar masing-masing unsur pokok dalam bahan bakar dihitung lalu dijumlahkan, maka akan ditemukan kebutuhan oksigen teoritis yang dibutuhkan untuk membakar sempurna seluruh bahan bakar. Oleh karena itu untuk memperoleh harga kebutuhan oksigen teoritis yang sebenarnya maka dibutuhkan oksigen yang telah dihitung berdasarkan persamaan reaksi pembakaran kemudian dikurangi dengan oksigen yang terkandung dalam bahan bakar (Diklat PLN, 2006).

B. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

Apabila dalam suatu analisis bahan bakar dinyatakan dalam persentase berdasar volume, maka suatu perhitungan yang serupa dengan perhitungan berdasarkan berat bisa digunakan untuk menentukan volume dari udara teoritis yang dibutuhkan. Untuk menentukan udara teoritis harus memahami Hukum Avogadro yaitu “gas-gas dengan volume yang sama pada suhu dan tekanan standar (0°C dan tekanan sebesar 1 Bar) berisikan molekul dalam jumlah yang sama” (Diklat PLN, 2006).

2.8.3 Udara Berlebih

Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O₂ yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari:

- Komposisi gas buang yang meliputi N₂, CO₂, O₂ dan CO
- Pengukuran secara langsung udara yang disuplai.

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{udara suplai} - \text{udara teoritis}}{\text{udara teoritis}} \times 100\% \quad \text{Sumber:}$$

Olaf A Hougen, 1943

Untuk pembakaran yang optimum, jumlah udara pembakaran yang sesungguhnya harus lebih besar daripada yang dibutuhkan secara teoritis. Bagian

dari gas buang mengandung udara murni, yaitu udara berlebih yang ikut dipanaskan hingga mencapai suhu gas buang dan meninggalkan boiler melalui cerobong. Analisis kimia gas-gas merupakan metode objektif yang dapat membantu untuk mengontrol udara dengan lebih baik. Dengan mengukur CO₂ atau O₂ dalam gas buang (menggunakan peralatan pencatat kontinyu atau peralatan Orsat atau beberapa peralatan *portable* yang murah) kandungan udara berlebih dan kehilangan di cerobong dapat diperkirakan. Udara berlebih yang dibutuhkan tergantung pada jenis bahan bakar dan sistim pembakarannya (UNEP, 2006).

2.8.4 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas (kalor). Proses pembakaran merupakan proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Proses pembakaran merupakan yang terjadi di dalam ruang bakar *boiler* bertujuan untuk merubah fase air menjadi fase uap (Hasibuan dan Napitupulu, 2013).

A. Bahan Bakar Solar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar minyak 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 (di atas 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:

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)

Alasan penggunaan bahan bakar solar sebagai bahan bakar boiler

- a. Lebih murah dibandingkan dengan LPG.
- b. Nilai kalor pembakaran yang tidak terlalu jauh dari gas.
- c. Bahan bakar fosil yang masih layak digunakan dan pemanfaatannya banyak digunakan di industri pembangkit.

Berikut tabel spesifikasi solar dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Solar

No.	Karakteristik	Satuan	Batasan		Metode Uji ASTM
			Min.	Maks.	
1	Bilangan cetana				
	Angka cetana	-	51	-	D 613-95
	Indeks cetana	-	48	-	D 4737 - 96a
2	Berat Jenis (pada 15°C)	kg/m ³	82	860	D 445 - 97
3	Viskositas (pada suhu 15°C)	mm ² /s	2	4,5	D 445 - 97
4	Kandungan sulfur	% mm	-	0,05	D 2622 - 98
5	Distilasi				
	T = 90°C	°C	-	340	
	T = 95°C	°C	-	360	
	Titik didih akhir	°C	-	370	
6	Titik Nyala		55	-	D 93 799c
7	Titik Tuang			18	D 97
8	Residu Karbon	% mm		0,3	D 4530 - 93
9	Kandungan Air	mg/kg		500	D 1744 - 92
10	Stabilitas Oksidasi	g/m ³	-	25	D 2274 - 94

(Sumber : Keputusan Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2006)

2.9 Efisiensi Thermal Boiler

Efisiensi Thermal *boiler* didefinisikan sebagai persen energi (panas) masuk yang digunakan secara efektif pada *steam* yang dihasilkan (anisya 2021). Untuk mengetahui kinerja sebuah *boiler* tidak cukup hanya dengan mengetahui efisiensinya saja. Dengan mengetahui efisiensi boiler saja kita hanya dapat menyatakan bahwa *boiler* yang dievaluasi masih dapat bekerja dengan baik atau tidak, atau dapat juga dikatakan jika *boiler* mengalami penurunan efisiensi, masih dalam batas kewajaran atau tidak (sugiharto 2020). Terdapat dua metode pengkajian efisiensi *boiler* yakni :

2.9.1 Metode Langsung

Metode langsung atau dikenal juga dengan metode *input-output*, dilakukan dengan cara membandingkan secara langsung energi panas yang diserap oleh air sehingga perubahan fase menjadi uap air (energi *output*), dengan energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar didalam ruang bakar *boiler* (energi *input*). Rumusan sederhana dari perhitungan metode langsung, sebagai berikut :

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

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

Dimana :

η_{fuel} : Efisiensi bahan bakar *boiler* (%)

Q_{steam} : Energi panas total yang diserap uap air (kalori)

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)

q : Debit kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

GCV : *Gross Calorific Value* atau nilai kalor spesifik bahan bakar (kcal/kg)

Pada metode langsung, ada beberapa parameter yang harus diukur secara presisi agar didapatkan hasil perhitungan yang akurat. Parameter – parameter tersebut antara lain :

- Debit air (*feedwater*) masuk ke *boiler*
- Tekanan dan temperature keseluruhan aliran fluida air umpan (*feedwater*) yang masuk ke dalam *boiler*
- Debit kebutuhan bahan bakar yang digunakan (kg/jam)
- Nilai kalor (*heating value*) bahan bakar (kcal/kg)

2.9.2 Metode Tidak Langsung

Metode tidak langsung merupakan perbedaan antara kehilangan dan energi yang masuk. Rumusan sederhana dari perhitungan metode tidak langsung, sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\text{panas yang diinginkan}}{\text{panas masuk}} \times 100\%$$

$$Q_{\text{in}} = \Delta H^{\circ}F + n c_p \Delta t (p) - n c_p \Delta t (r)$$

$$C_p = A + BT + CT^2$$

$$C_{\text{pm}} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} (A + BT + CT^2) dT}{T_{\text{in}} - T_{\text{ref}}}$$