

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

2.1.1 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 (MF Syahputra.2010).

2.1.2 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).

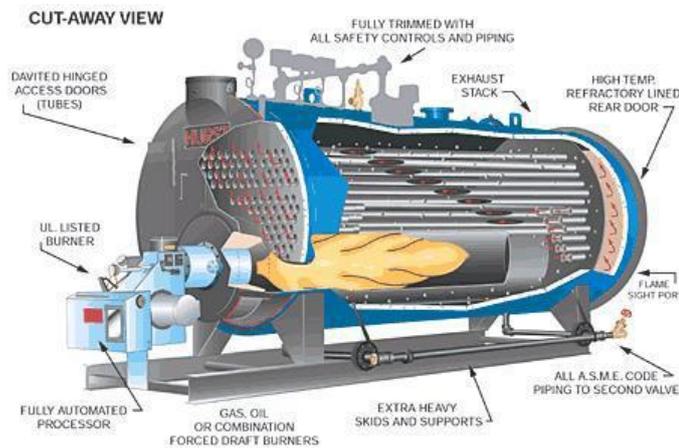
2.1.3 Jenis-Jenis Boiler

A. Ketel 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. Pipa-pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan. Volume air kira – kira $\frac{3}{4}$ dari tangki ketel.

Jumlah pass dari *boiler* tergantung dari jumlah laluan vertikal dari pembakaran diantara *furnace* dan pipa–pipa api. Laluan gas pembakaran pada *furnace* dihitung sebagai pass pertama *boiler* jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dan

Karnowo 2008: 180). Dalam perancangan *boiler* ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar *boiler* yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang dibutuhkan.



Gambar 2.1 Boiler Pipa Api

(Sumber: *Feedwater.co.uk*, 2018)

B. Packaged Boiler

Disebut *boiler* paket sebab sudah tersedia sebagai paket yang lengkap. Pada saat dikirim ke pabrik, hanya memerlukan pipa *steam*, pipa air, suplai bahan bakar dan sambungan listrik untuk dapat beroperasi. Paket *boiler* biasanya merupakan tipe *shell and tube* dengan rancangan *fire tube* dengan transfer panas baik radiasi maupun konveksi yang tinggi.

Ciri-ciri dari *packaged boiler* adalah:

1. Kecilnya ruang pembakaran dan tingginya panas yang dilepas menghasilkan penguapan yang lebih cepat.
2. Banyaknya jumlah pipa yang berdiameter kecil membuatnya memiliki perpindahan panas konvektif yang baik.
3. Sistem *forced* atau *induced draft* menghasilkan efisiensi pembakaran yang baik.
4. Sejumlah lintasan/pass menghasilkan perpindahan panas keseluruhan yang lebih baik.
5. Tingkat efisiensi termisnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan *boiler* lainnya.



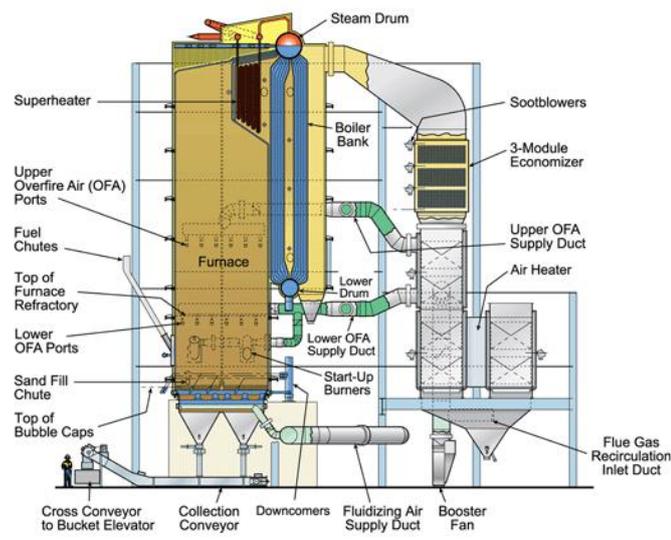
Gambar 2.2 Oil fired packaged boiler

(Sumber: www.sitong-boiler.com, 2014)

Boiler tersebut dikelompokkan berdasarkan jumlah pass nya yaitu berapa kali pembakaran melintasi *boiler*. Ruang pembakaran ditempatkan sebagai lintasan pertama setelah itu kemudian satu, dua, tiga set pipa api. *Boiler* yang paling umum dalam kelas ini adalah unit tiga pass/lintasan dengan dua set *fire-tube*/pipa api dan gas buangnya keluar dari *boiler*.

C. Fluidized Bed Combustion

Fluidized bed combustion (FBC) muncul sebagai alternatif dan memiliki keuntungan yang signifikan atas sistem pembakaran konvensional dan memberikan banyak keuntungan, desain kompak *boiler*, fleksibilitas bahan bakar, efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dan mengurangi emisi polutan berbahaya seperti SO_x dan NO_x. Bahan bakar dibakar di *boiler* ini termasuk batubara, sekam padi, ampas tebu & limbah pertanian lainnya. *Boiler fluidized bed* memiliki kapasitas yang luas sebarannya 0,5 T / jam sampai lebih dari 100 T / jam.

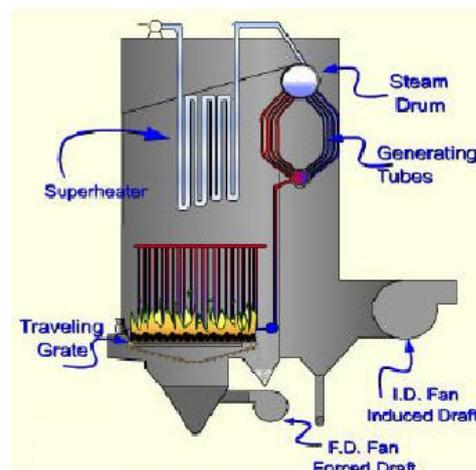


Gambar 2.3 *Fluidized Bed Boiler*

(Sumber: www.babcock.com, 2016)

D. Stoker Fired Boiler

Stoker diklasifikasikan menurut metode memasukan bahan bakar ke tungku dan oleh jenis *grate*. Klasifikasi utama adalah *spreader stoker* dan *chain-gate* atau *traveling-gate stoker*.



Gambar 2.4 *Spreader Stoker Boiler*

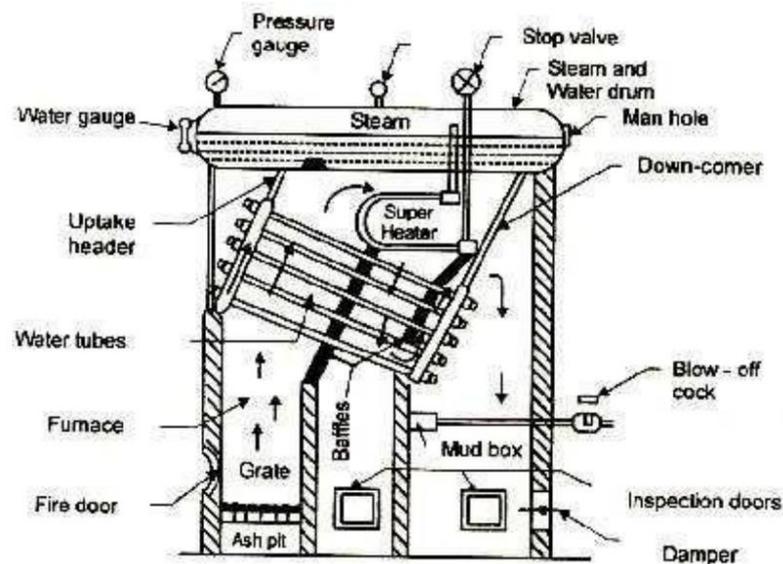
(Sumber: Steamofboiler.blogspot.com, 2011)

E. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Ketel 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).

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 (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. Unit pengolahan yang sudah modern banyak menggunakan *water tube boiler* sebagai pilihan, karena dapat menghasilkan uap air dengan kapasitas, temperatur, dan tekanan yang tinggi sesuai kebutuhan.



Gambar 2.5 *Water Tube Boiler*
(Sumber: Designengineeringfaq.blogspot.com, 2012)

Keuntungan-keuntungan ketel pipa air:

1. Menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dari pada ketel pipa api.

2. Untuk daya yang sama, menempati ruang/tempat yang lebih kecil dari pada ketel pipa api.
3. Laju aliran uap lebih tinggi.
4. Komponen-komponen yang berbeda bisa diurai sehingga mudah untuk dipindahkan.
5. Permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus.
6. Pecah pada pipa air tidak menimbulkan kerusakan ke seluruh ketel.

Kerugian-kerugian ketel pipa air:

1. Air umpan mensaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa. Jika terbentuk kerak di dalam pipa bisa menimbulkan panas yang berlebihan dan pecah.
2. Ketel pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati bagi penguapannya, karena itu akan menimbulkan biaya operasi yang lebih tinggi.
3. Pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.

2.1.4 Sistem Boiler

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 mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.1.5 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 temperatur 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 boiler terdiri dari temperatur air umpan, temperatur steam dan temperatur bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai kebutuhan uapnya. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam *boiler*. Sistem bahan bakar merupakan semua alat yang digunakan dalam menyediakan bahan bakar agar menghasilkan panas yang dibutuhkan. Prinsip kerja *boiler* yaitu mengubah dan memindahkan temperatur yang dimiliki bahan bakar menjadi temperatur yang dimiliki uap air. Pemanas ruangan juga merupakan salah satu aplikasi dari *boiler*.

2.1.6 Steam

Uap atau *steam* merupakan gas yang dihasilkan dari proses yang disebut penguapan. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan *steam* adalah air bersih. Air dari *water treatment* yang telah diproses dialirkan menggunakan pompa ke *feed water drum* hingga pada *level* yang telah ditentukan. Dengan meningkatnya suhu dan air telah mendekati kondisi didihnya, beberapa molekul mendapatkan temperatur yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuat sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang di atas permukaan, sebelum jatuh kembali ke cairan. Pemanasan lebih lanjut menyebabkan eksitasi lebih besar dan sejumlah molekul dengan temperatur cukup untuk meninggalkan cairan jadi meningkat. Dengan mempertimbangkan struktur molekul cairan dan uap, dapat diambil kesimpulan bahwa densitas *steam* lebih kecil dari air, sebab molekul *steam* terpisah jauh satu dengan yang lain. Ruang yang secara tiba-tiba terjadi di atas permukaan air menjadi terisi dengan molekul *steam* yang padat. Dalam hal ini pembakaran air dalam *boiler* adalah air yang melalui *feed water drum* yang telah melalui pemanasan didalamnya yang dialirkan ke steam drum (penampung steam) dan kemudian disuplai kedalam *boiler* untuk dipanaskan lebih lanjut sehingga menjadi *steam* basah.

Jika jumlah molekul yang meninggalkan permukaan cairan lebih besar dari yang masuk kembali, maka air akan menguap dengan bebas. Pada keadaan ini air telah mencapai titik didihnya atau suhu jenuhnya, yang dijenuhkan oleh temperatur panas. Jika tekananya tetap penambahan lebih banyak panas tidak

mengakibatkan kenaikan suhu lebih lanjut namun menyebabkan air akan membentuk steam jenuh. Pada tekanan atmosfer suhu jenuh air adalah 100 °C, tetapi jika tekananya bertambah maka temperatur penambahan lebih banyak panas dan peningkatan suhu tanpa perubahan fase. Oleh karena itu, kenaikan tekanan secara efektif akan meningkatkan entalpi air dan suhu jenuhnya.

Jika *steam* mengalir dari *boiler* pada kecepatan yang sama dengan yang dihasilkannya, penambahan panas lebih lanjut akan meningkatkan laju produksinya. Jika *steam* yang sama tertahan tidak meninggalkan *boiler*, dan jumlah panas yang masuk dijaga tetap, energi yang mengalir ke *boiler* akan lebih besar daripada energi yang mengalir keluar. Energi yang berlebih ini akan menaikkan tekanan, yang pada gilirannya akan menyebabkan suhu jenuh meningkat, karena suhu steam jenuh berhubungan dengan tekananya.

2.1.7 Komponen- Komponen Boiler

- *Furnace* (Ruang bakar)
- *Burner*
- *Steam Drum*
- *Water Drum*
- *Superheater*
- Kompresor
- *Safety valve*
- *Pressure Indicator*
- *Temperature Indicator*
- *Water Level Indicator*
- *Steam Valve*
- *Drain Valve*
- *Nozzle*

2.2 Proses 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 merupakan salah satu elemen bumi paling umum yang jumlahnya mencapai 20.9% dari udara. Bahan bakar padat atau cair harus diubah kebentuk 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.

2.2.1 Faktor Utama Proses Pembakaran

Terjadinya proses pembakaran bergantung pada tiga faktor utama yang dikenal dengan “3T”, yaitu:

1. Time (waktu),
2. Turbulence (turbulensi aliran)
3. Temperature (suhu)

Artinya tercapainya suatu fase pembakaran harus memenuhi waktu penyalaan (time to ignition) yang bergantung pada beberapa suhu ideal agar pembakaran dapat terjadi dan bagaimana kondisi aliran fluidanya. Semakin turbulen aliran fluida yang terjadi, maka proses perpindahan panas juga akan semakin cepat.

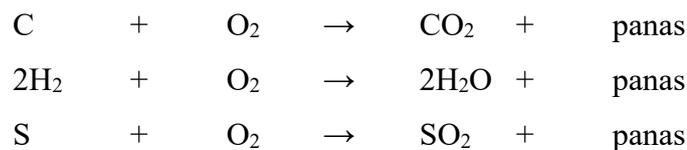
Pada proses pembakaran dengan proses penyalaan api yang normal, dibutuhkan tiga komponen utama untuk tercapainya suatu fase pembakaran, yaitu panas, bahan bakar dan oksigen. Ketiganya merupakan elemen-elemen yang harus ada untuk mewujudkan terjadinya proses pembakaran, sehingga jika salah satu elemen ditiadakan maka proses pembakaran yang ditandai dengan adanya nyala api dapat terhenti. Konsep inilah yang kemudian dijadikan dasar dalam mengontrol nyala api dari pembakaran. Tetapi, pada dasarnya keberadaan tiga elemen itu saja belum cukup untuk memenuhi syarat terjadinya nyala api pembakaran.

Nyala api yang terbentuk dari proses pembakaran merupakan fenomena yang terjadi dalam fasa gas, karena proses pembakaran baru terjadi apabila campuran udara dan bahan bakar sudah berada pada fase yang sama (fase gas). Sehingga pembakaran yang menghasilkan nyala api dengan bahan bakar cair dan padat harus didahului dengan proses fase bahan bakar menjadi fase gas terlebih dahulu untuk dapat bercampur dengan udara. Untuk bahan bakar cair, proses ini pada umumnya berupa penguapan sederhana dari hasil pendidihan pada permukaan bahan bakar. Pada dasarnya, vapisasi dari bahan bakar cairan hanya akan terjadi pada tingkat temperature permukaan tertentu dari cairan itu sendiri.

Selanjutnya, uap hasil vaporasi tersebut akan bercampur dengan oksigen yang terkandung di dalam udara (*oxidizer*) untuk membentuk campuran yang dapat terbakar. Setelah bahan bakar berubah fase menjadi gas dan bersifat mudah terbakar (*volatile*), bahan bakar akan dengan mudah bercampur dengan udara sebagai oksidator, kemudian ketika reaksi campuran udara dan bahan bakar sudah cukup panas, nyala api akan terbentuk sebagai tanda terjadinya proses pembakaran dengan atau pemantikan menggunakan *electrical spark igniter*.

2.2.2 Reaksi Kimia pada Proses Pembakaran

Reaksi pembakaran adalah reaksi kimia bahan bakar dan oksigen yang diperoleh dari udara yang akan menghasilkan panas dan gas sisa pembakaran yang berlangsung dalam waktu yang sangat cepat. Reaksi pembakaran tersebut akan menghasilkan produk hasil pembakaran yang komposisinya tergantung dari kualitas pembakaran yang terjadi. Dalam pembakaran, proses yang terjadi adalah oksidasi dengan reaksi sebagai berikut :



Reaksi pembakaran baik bahan bakar cair maupun bahan bakar gas merupakan reaksi oksidasi antara senyawa hidrokarbon dengan oksigen sehingga dihasilkan produk berupa karbon dioksida, uap air, oksida nitrogen atau produk lainnya tergantung pada kualitas pembakaran.

2.3 Bahan Bakar LPG (*liquified petroleum gas*)

LPG (*liquified petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam atau kilang *crude oil*. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C₃H₈) dan butana (C₄H₁₀). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C₂H₆) dan pentana (C₅H₁₂). Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara (PT. Aptogas Indonesia, 2015) Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasaya sekitar 250:1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Bahan Bakar LPG

Properties	Metode Uji	LPG Mix	LPG Propane	LPG Butana
Berat Jenis Relatif pada 60/60°C	ASTMD-1657	Dilaporkan	Dilaporkan	Dilaporkan
Tekanan Uap pada 100°F, Psig	ASTMD-1267	Max. 145	Max. 210	Max. 70
Weathering Test pada 36°F, %vol	ASTMD-1837	Min. 95	Min. 95	Min. 95
Korosi Bilah Tembaga, 1 hr pada 100°F	ASTMD-1838	Max. No.1	Max. No 1	Max. No 1
Total Sulfur, grains/cuft	ASTMD-2784	Max. 15	Max. 15	Max. 15
Kandungan Air	Visual	No free water	-	-
Komposisi: C ₂ , %vol			-	-
C ₃ , %vol		Max. 0,8		-
C ₄ , %vol	ASTMD-2163	Min. 97,0	Min. 95	Min. 97,5
C ₅ , %vol				Max. 15
C ₆₊ , %vol		Max. 2,0	Max. 2,5	Nil
Etil/Butil Merkaptan, ml/100 AG		50	50	50

(Sumber: SK Dirjen Migas No. 26525.K/10/DJM.T/2009 Tanggal 31 Desember 2009)

2.4 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).

2.4.1 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).

2.4.2 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.

$$DS_{\text{tot}} \geq 0$$

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.

2.5 Kebutuhan Udara Pembakaran

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

2.5.1 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 jumlah mol bahan bakar. Prosedur ini merupakan prosedur yang paling sering digunakan untuk mendefinisikan pencampuran udara dengan bahan bakar. *Air Fuel Ratio* (AFR) adalah rasio perbandingan antara massa bahan bakar dengan udara yang terjadi pada suatu reaksi pembakaran. Pada reaksi pembakaran, AFR memegang peran penting dalam menentukan jalannya proses pembakaran tersebut, selain itu AFR juga berperan dalam pembentukan nyala api dan hasil gas buang dari suatu proses pembakaran. Persamaan AFR pada campuran stoikiometri dituliskan dalam rumus sebagai berikut.:

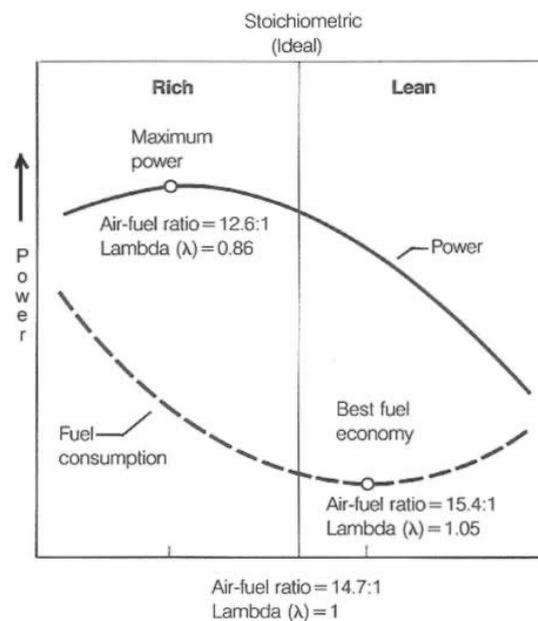
$$AFR_{stoikiometri} = \frac{n_{udara}}{n_{bahan\ bakar}}$$

Keterangan:

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

n_{udara} = Jumlah mol udara

$n_{bahan\ bakar}$ = Jumlah mol bahan bakar



Gambar 2.6 Diagram Stoikiometri

(Sumber: Autoonlineschool.blogspot.com, 2013)

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 :

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

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

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

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

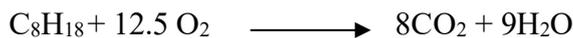
$$\text{H}_2\text{O} = 0.01 \%$$

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

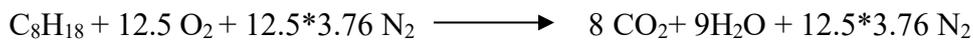
- BM udara = 28.967 kg udara/k.mol = 29 kg udara/k.mol.
- Untuk 1 k.mol udara = $79/21 = 3.76$ k.mol N_2 yang ikut.

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) :

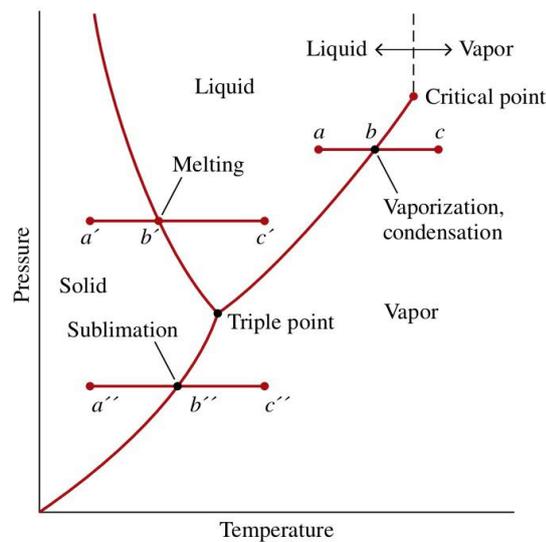
$$m_f = 1 \text{ k.mol} \times (8 \times 12 + 18 \times 1) \text{ kg bb/kmol}$$

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

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

2.6 Diagram Fase Air

Diagram fase air adalah sebuah diagram tekanan-temperatur yang menunjukkan perubahan-perubahan fisika air pada berbagai kondisi. Secara sederhana diagram fase air ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.

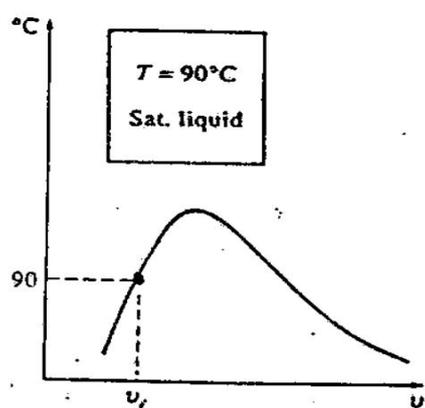


Gambar 2.7 Diagram fase air

(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,

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

$$\text{Volume Spesifik cairan jenuh pada } 90^\circ\text{C } V = V_f \text{ pada } 90^\circ\text{C} = 0,001036 \text{ M}^3/\text{kg}$$

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

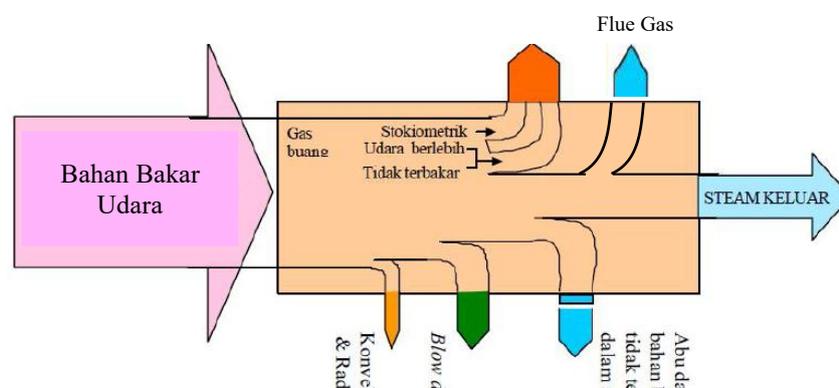
$$= (50)(0,001036)$$

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

2.7 Neraca Panas

Proses pembakaran dalam ketel uap dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energy atau diagram *Sankey*. Gambar 2.10 menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi.

Neraca panas merupakan keseimbangan energi total yang masuk ketel uap terhadap yang meninggalkan ketel uap dalam bentuk yang berbeda. Tujuan dari pengkajian energi mengurangi kehilangan energi yang dapat dihindari, dengan meningkatkan efisiensi energi (Unep,2006).





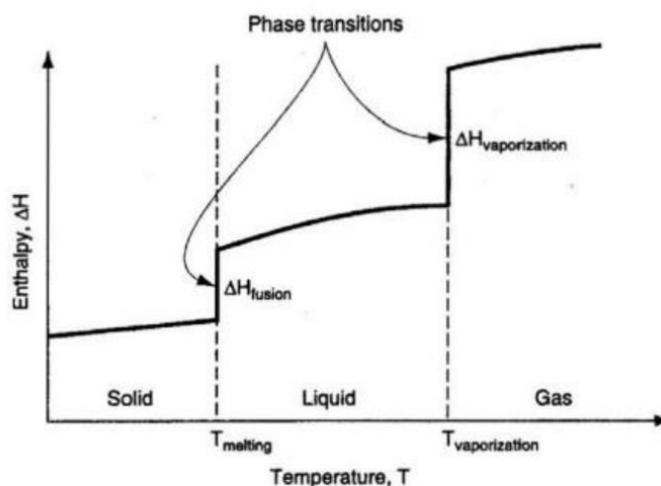
Konveksi Panas
Radiasi Penguapan
Koduksi H₂O

Gambar 2.8 Diagram Sankey pada *Boiler*
(Sumber: *Dokumen.tips*)

2.8 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 2.10 di bawah ini:



Gambar 2.9 Diagram Temperatur-Entalpi pada Perubahan Fasa

Transisi Fasa terjadi dari fasa padat menjadi fasa cair, dari fasa cair menjadi fasa gas dan sebaliknya. Pada proses transisi ini terjadi perubahan entalpi

(dan energi dalam) dimana terjadi pada temperatur tetap yang disebut panas laten. Perubahan entalpi pada fasa yang sama disebut dengan panas sensibel.

Jenis-jenis panas laten:

- a) Panas peleburan (*Heat of Fusion*) (ΔH_{fusion})
 - 1) Terjadi pada perubahan fasa dari padat ke cair
- b) Panas Pemadatan
 - 2) Terjadi pada perubahan fasa dari cair ke padat
- c) Panas Penguapan (*Heat of Vaporization*) (ΔH_v)
 - 3) Terjadi pada perubahan fasa dari cair ke gas
- d) Panas Kondensasi (*Heat of Condensation*)
 - 4) Terjadi pada perubahan fasa dari gas ke cair

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
325	13.53	0.001013	11.04	217.3	2377.6	2594.9
330	17.21	0.001015	8.809	238.4	2365.3	2603.7
335	21.71	0.001018	7.083	259.4	2353.0	2612.4
340	27.18	0.001021	5.737	280.5	2340.5	2621.0

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

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

2.9 Efisiensi Termal Boiler

Efisiensi *boiler* merupakan informasi yang sangat penting untuk pemilik *boiler*, yang turut berpengaruh terhadap biaya operasi. Berdasarkan standard *ASME power test code PTC 4.1*, terdapat dua metode untuk menghitung efisiensi *boiler*, yaitu metode *direct* dan metode *indirect*. Metode *direct* atau *input-output* adalah metode yang menggunakan perbandingan besar energi panas yang keluar dengan energi panas yang masuk ke dalam *boiler*. Besar energi yang masuk berasal dari nilai kalori LPG dan jumlah bahan bakar, nilai kalori dapat dicari dengan mengambil beberapa sampel kemudian melakukan penelitian di laboratorium. Sedangkan, besar energi yang keluar berasal dari jumlah *steam* yang dihasilkan, *enthalpi steam* dan feed water.

$$\eta = \frac{\text{Heat absorbed by working fluid fuel}}{\text{energy input}} \times 100\%$$

Metode *indirect* adalah metode yang menggunakan selisih antara besar energi input dan losses. Metode ini biasanya disebut metode heat losses.

$$\eta = \text{fuel energy input} - \text{energy lost up} \times 100\%$$