

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pengertian *Boiler*

*Boiler* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang terbuat dari baja dan digunakan untuk menghasilkan uap atau *steam* (Singgih, Agus. 2016). *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin. 2012). *Boiler* dirancang sebagai tempat perpindahan kalor dari satu sumber pembakaran yang biasanya pembakaran berupa bahan bakar. Air yang berada didalam *boiler* dipanaskan dari hasil pembakaran bahan bakar sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas ke air tersebut menjadi panas dan berubah wujud menjadi *steam* atau 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 mempunyai berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang mempunyai berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (MF Syahputra. 2010)

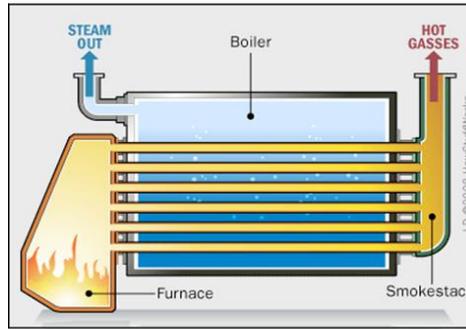
*Boiler* berfungsi untuk menghasilkan *steam* yang akan digunakan untuk kebutuhan proses industri, membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik dan juga untuk disalurkan ke perumahan karyawan disekitar pabrik.

#### 2.1.1 Jenis-Jenis *Boiler*

Berdasarkan fluida yang mengalir didalam pipa boiler terbagi menjadi:

##### 1) *Boiler pipa api (fire water tube)*

*Boiler* pipa api (*fire tube boiler*) merupakan *boiler* yang dimana gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan *boiler* berada di dalam *shell* untuk diubah menjadi *steam*. Pipa-pipa boiler pipa api akan terendam di dalam air dan akan teruapkan. Volume air kira-kira 3/4 dari tangki boiler. *Boiler* pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas 10 ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm<sup>2</sup>. Untuk lebih jelas *boiler* pipa api tipe vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 *Boiler Pipa Api*

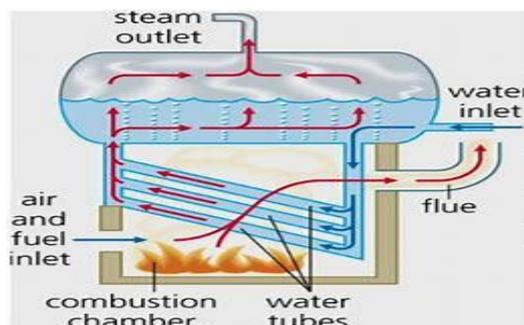
Karena kapasitas *steam* yang relative kecil, tekanan dan temperatur uap yang dihasilkan rendah maka *boiler pipa api* jarang digunakan untuk pengolahan modern. *Boiler* pipa api memiliki konstruksi yang relatif sederhana, kokoh, dan mudah dijangkau harganya.

Ciri khas boiler pipa air adalah:

1. Air pengisi boiler melalui pipa, gas panas (*flue gas*) berada di luar pipa
2. Kapasitas uap berkisar antara 4.500- 120.000 ton/jam
3. Memerlukan kualitas air yang sangat ketat
4. Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari pengolahan air
5. Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.

2) *Boiler pipa air (Water Tube Boiler)*

*Boiler pipa air* merupakan *boiler* dimana air umpannya mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam *drum*. Air yang tersirkulasi panas pengapian terjadi di luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air dan sebelumnya air tersebut dikondisikan terlebih dahulu melalui *economizer*, kemudian uap yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan didalam sebuah *steam drum*. Sampai tekanan dan temperatur sesuai. Untuk lebih jelas *boiler* pipa air dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 *Boiler pipa air*

Karakteristik dari jenis *boiler pipa air* ini menghasilkan kapasitas dan tekanan *steam* yang tinggi (42-123 kg/cm<sup>3</sup>).

Keuntungan dan Kerugian *Ketel Pipa Air*

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 daripada ketel pipa api
3. Laju aliran uap lebih tinggi.

Kerugian *ketel pipa air* :

1. Air umpan mensyaratkan mempunyai kemurnian yang 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.

### 2.1.2 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).

- 1) Sistem air umpan (*feed water system*) merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam *boiler*.
- 2) 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.
- 3) 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.

### 2.1.3 Prinsip kerja *boiler*

Prinsip kerja *boiler*, air yang berada didalam *steam drum* dipanaskan dari hasil pembakaran bahan bakar didalam *furnace*. Panas pembakaran yang terjadi di *furnace* menyebabkan terjadinya perpindahan sumber panas bahan bakar ke air sehingga air yang berada di *steam drum* menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah temperatur dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air didalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (Djokosetyardjo, 1990). Prinsip kerja *boiler* yaitu mengubah dan memindahkan energi yang dimiliki bahan bakar menjadi energi yang dimiliki oleh uap air.

### 2.1.4 Komponen- komponen *Boiler*

#### 1. *Furnace* ( Ruang bakar )

*Furnace* (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang bakar sehingga terjadi pembakaran.

#### 2. *Burner*

*burner* adalah alat yang digunakan dalam proses pembakaran bahan bakar sehingga menghasilkan sumber panas yang diperlukan. Fungsi utamanya yaitu :

- a) Mensuplai bahan bakar ke ruang bakar.
- b) Mensuplai udara ke ruang pembakaran.
- c) Mencampur udara ke *fuel*.
- d) Memberikan nyala api dan membakar campuran udara *fuel*.
- e) Memberikan hasil pembakaran

#### 3. *Steam Drum*

*Steam drum* merupakan tempat penampungan air panas dan pembangkitan *steam*. *Steam* masih bersifat jenuh (*saturated*).

#### 4. *Superheater*

*Superheater* merupakan tempat pengeringan *steam* dan siap dikirim melalui *main steam pipe* dan siap untuk menggerakkan turbin steam atau menjalankan proses industri.

#### 6. *Safety valve*

Komponen ini merupakan saluran buang *steam* jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan *boiler* menahan tekanan *steam*.

#### 7. *Blowdown valve*

Komponen ini merupakan saluran yang berfungsi membuang endapan yang berada di dalam pipa *steam*.

#### 8) *Water Drum*

*Drum* bawah berfungsi sebagai tempat pemanasan air *ketel* yang didalamnya dipasang plat-plat pengumpul endapan lumpur untuk memudahkan pembuangan keluar (*Blowdown*). Selain itu, *water drum* juga berfungsi sebagai tempat pengendapan kotoran-kotoran air dalam *ketel*, yang tidak menempel pada dinding *ketel*, melainkan terlarut dan mengendap.

Peralatan-peralatan itu antara lain adalah :

- 1) Instrumentasi yang berfungsi mengukur, mengatur dan mengamankan operasi sebagai pengontrol kestabilan proses operasi *boiler*.
- 2) *Feed water pump* yang berfungsi untuk memompakan air ke *boiler*
- 3) *Kompresor* yang berfungsi untuk memproduksi udara bertekanan sebagai kebutuhan alat *instrument boiler*

#### 9. *Pressure Indicator*

*Pressure instrument* adalah alat yang berfungsi untuk mengukur tekanan *steam* yang dihasilkan dalam *steam drum* pada *boiler*.

#### 10. *Temperature Indicator*

*Temperature instrument* adalah alat yang berfungsi untuk mengukur temperatur *steam* yang dihasilkan dalam *steam drum* pada *boiler*.

#### 11. *Water Level Volume*

*Water level volume* adalah alat yang berfungsi untuk mendeteksi volume air, ketinggian air, dan kualitas air didalam *drum*.

### 2.2 *Steam*

*Steam* merupakan gas ideal yang tidak terlihat yang dihasilkan dengan penambahan panas di dalam air (penguapan). *Steam* dapat diidentifikasi dengan mengetahui tekanan dan temperaturnya. *Steam* atau uap adalah gas yang

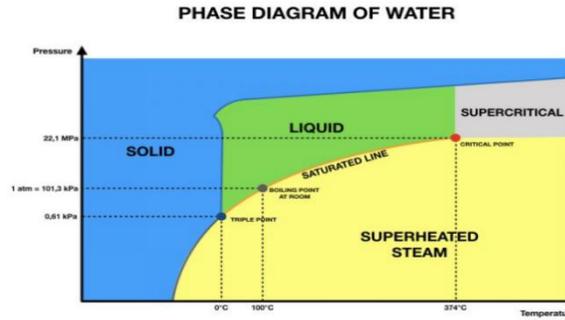
dihasilkan dari proses pemanasan yang disebut penguapan. Air merupakan bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. Air dari *water treatment* yang telah diproses dialirkan menggunakan pompa ke *feed water drum* hingga pada level yang telah ditentukan. Dengan meningkatnya temperatur dan air yang telah mendekati kondisi didihnya, beberapa molekul mendapat temperatur yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuat sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang diatas permukaan sebelum jatuh kembali ke cairan.

Pemanasan yang lebih lanjut akan menyebabkan eksistensi 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 kosong diatas permukaan air menjadi terisi dengan molekul *steam* yang padat. Dalam yang di hal ini terjadi pembakaran air dalam *boiler*. Air yang melalui *feed water drum* yang telah melalui pemanasan didalamnya yang dialirkan ke *steam drum* dan kemudian disuplai *boiler* untuk dipanaskan lebih lanjut sehingga menjadi *steam* basah.

*Steam* dapat dibedakan menjadi tiga macam, yaitu sebagai berikut ( kusumadewi, 2015 )

1. *Saturated steam* yaitu uap air yang terbentuk pada suhu didih dan tidak mengandung titik-titik air maupun gas asing.
2. *Wet steam* yaitu campuran dari *saturated steam* dan titik-titik air yang terdistribudi merata. *Steam* ini terbentuk misalnya pada waktu air mendidih dengan sangat kuat atau karena kondensasi sebagian dari uap jenuh.
3. *Superheated steam* yaitu uap yang dipanaskan melebihi temperatur didihnya. Pada tekanan yang sama *steam* ini memiliki kerapatan lebih rendah dari pada *saturated steam*.

Untuk lebih jelas diagram fase air dapat dilihat pada Gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Diagram fase air

### 2.3 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan suatu proses dari reaksi kimia antara suatu bahan bakar dengan oksigen, yang memerlukan sumber panas sebagai media penyalanya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah *karbon*, *hidrogen* dan *sulfur*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Segitiga Api

Untuk mendukung terjadinya pembakaran diperlukan tiga kondisi yang harus dipenuhi secara bersamaan, yaitu :

- a) Adanya Oksigen

Didalam kimia pembakaran diperlukan percampuran antara bahan bakar dengan oksigen. Tanpa oksigen pembakaran tidak akan terjadi. Oksigen disini dapat diperoleh dari udara sekitar.

- b) Bahan Bakar

Bahan bakar hanya akan menyala jika temperaturnya naik sesuai mendekati temperatur oksigen. Hal ini disebut sebagai "temperatur penyalaan" (*ignition temperature*). *Material combustible* memiliki titik temperatur penyalaan sendiri-sendiri.

c) Sumber Penyalaan

Proses pembakaran dapat terjadi jika bahan bakar dan oksigen bereaksi pada temperatur penyalannya. Sumber ini dapat berupa percikan api, api, bara atau metal yang membara.

Pembakaran sempurna terjadi apabila zat reaksi terbakar seluruhnya di dalam oksigen dan menghasilkan beberapa jenis produk. Pada pembakaran sempurna apabila *hidrokarbon* terbakar di dalam oksigen maka, efek reaksi akan hanya menghasilkan karbondioksida dan air. Pembakaran sempurna terjadi jika semua unsur C, H dan S yang terkandung dalam bahan bakar bereaksi membentuk CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan SO<sub>2</sub>. Pembakaran sempurna dapat dicapai apabila campuran antara bahan bakar dan oksida tepat, dengan rasio udara dengan bahan bakar yang tepat pula. Jumlah bahan bakar dan oksida dalam pembakaran sempurna harus *stoikiometris*. Campuran *stoikiometris* terjadi jika jumlah oksigen dalam campuran tepat untuk bereaksi dengan C, H dan S membentuk CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan SO<sub>2</sub>.



Pembakaran bertujuan untuk melepaskan seluruh panas yang terdapat pada bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “Tiga T” yaitu:

1) T- Temperatur

Temperatur yang digunakan untuk pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia. Supaya proses pembakaran suatu zat terjadi, maka temperatur dari zat tersebut harus berada pada suatu harga tertentu yang cukup untuk memulai terjadinya reaksi.

2) T- *Turbulensi*

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan oksidator. Oksigen di dalam udara yang dialirkan ke ruang bakar ada kemungkinan dapat langsung mengalir ke cerobong tanpa kontak dengan bahan bakar. Hal semacam ini dapat dihindari dengan cara memusarkan aliran udara. Turbulensi udara akan membentuk pencampuran yang baik antara udara bahan bakar sehingga akan diperoleh proses pembakaran yang sempurna.

### 3) T- Time

Waktu harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia. Setiap reaksi kimia memerlukan waktu tertentu untuk pembakaran. Dalam proses pembakaran tidak terlepas dari penyalaan yaitu sebuah keadaan transisi dari tidak reaktif ke reaktif karena rangsangan atau dorongan eksternal yang memicu reaksi termokimia diikuti dengan transisi yang cepat sehingga pembakaran dapat berlangsung. Penyalaan terjadi bila panas yang dihasilkan oleh pembakaran lebih besar dari panas yang hilang ke lingkungan. Dalam proses penyalaan ini dapat dipicu oleh energi termal yang merupakan transfer energi termal ke reaktan oleh *konduksi*, *konveksi*, *radiasi* atau kombinasi dari ketiga macam proses tersebut.

## 2.4 Kebutuhan udara pembakaran

Dalam sistem pembakaran di *boiler*, perbandingan antara udara dan bahan bakar memiliki peranan yang penting dalam kualitas pembakaran. Jumlah udara yang terlalu sedikit, akan menyebabkan terlalu sedikit oksigen yang digunakan untuk mengubah bahan bakar *hidrokarbon* menjadi *karbon dioksida* dan air. Jumlah udara terlalu sedikit juga berarti pemborosan bahan bakar, karena tidak semua bahan bakar yang digunakan terbakar dan menjadi energi. Selain itu jumlah udara yang terlalu banyak juga akan menyebabkan pembakaran tidak sempurna. Hal ini disebabkan karena kelebihan oksigen dan nitrogen akan menyebabkan terserapnya energi dalam pembakaran dan sisa gas buang ini akan dibuang melewati *stack*, sehingga sebagian energi yang dihasilkan akan terbuang dan menyebabkan tekanan operasi menurun.

Untuk menjaga perbandingan jumlah udara dan bahan bakar pada nilai yang optimal dengan menggunakan *air fuel ratio control* (ratio antara udara/bahan bakar). 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.

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

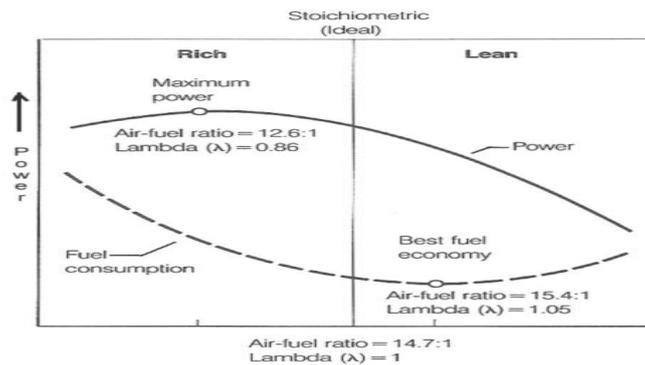
(Powers, 2014)

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

udara = Jumlah mol udara

bahan bakar = Jumlah mol bahan bakar

Untuk diagram stoikiometri dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Diagram Stoikiometri rasio udara bahan bakar

#### 2.4.1 *Excess Air* (Udara Lebih)

Bahan bakar di dalam *boiler* memerlukan udara dalam jumlah tertentu untuk terjadinya proses pembakaran yang sempurna. Hal ini merupakan “*theoretical air*” yang diperlukan untuk terjadinya proses pembakaran dalam kondisi yang sempurna. Akan tetapi, karena kondisi yang tidak sempurna di dalam *boiler*, maka diperlukan udara yang jumlahnya lebih besar dari *theoretical air* untuk menjamin terjadinya proses pembakaran secara sempurna. Jumlah udara lebih inilah yang disebut “*excess air*”.

Tabel 2.1 *Excess Air* dan  $O_2$  optimum pada gas buang berbagai Bahan Bakar

Bahan Bakar	Optimum <i>Excess Air</i> %	Optimum $O_2$ pada Stack Gas %
<i>Batubara</i>	20 - 25	4 - 4,5
<i>Biomassa</i>	20 - 40	4 - 6
<i>Stoker firing</i>	25 - 40	4,5 - 6,5
<i>BBM</i>	5 - 15	1 - 3
<i>Gas Bumi/ LPG</i>	5 - 10	1 - 2
<i>Black Liquor</i>	5 - 10	1 - 2

Sumber : Sonden winarto

## 2.5 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 ( $C_3H_8$ ) dan butana ( $C_4H_{10}$ ). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana ( $C_2H_6$ ) dan pentana ( $C_5H_{12}$ ). Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara (PT. Aptogas Indonesia, 2015)

Berdasarkan cara pencairannya, LPG dibedakan menjadi dua, yaitu LPG *Refrigerated* dan *LPG Pressurized*. LPG *pressurized* adalah LPG yang dicairkan dengan cara ditekan ( $4-5 \text{ kg/cm}^2$ ). LPG jenis ini disimpan dalam tabung atau tangki khusus bertekanan. LPG jenis inilah yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi di rumah tangga dan industri, karena penyimpanan dan penggunaannya tidak memerlukan penanganan khusus seperti LPG *Refrigerated*. (Cahyono, 2011)

### 2.5.1 Sifat Fisik LPG

Tabel 2.2 Sifat Fisik dan Komponen Utama LPG

Komponen	Titik Didih (°C)	Tekanan Uap	Densitas Cairan ( $\text{kg/m}^3$ )	Nilai Kalor (kJ/kg)
<i>Propana</i>	-42,1	1310	506,0	50.014
<i>Propena</i>	-47,7	1561	520,4	48.954
<i>n-butana</i>	-0,5	356	583,0	49.155
<i>Isobutana</i>	-11,8	498	561,5	49.051
<i>i-butena</i>	-6,3	435	599,6	48.092
<i>cis-2-butena</i>	3,7	314	625,4	47.941
<i>trans-2-butena</i>	0,9	343	608,2	47.878
<i>Isobutena</i>	-6,9	435	600,5	47.786

### 2.5.2 Sifat Kimia LPG

1. Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar
2. Gas tidak beracun, tidak berwarna, dan tidak berbau.

3. Berbentuk cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
4. Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.
5. Berat jenis lebih besar dibanding udara sehingga cenderung menempati daerah yang rendah (bergerak ke bawah).
6. Gas yang dicairkan adalah gas Propana dan Butana (C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub>)

Tabel 2.3 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 <sub>2</sub> , %vol			-	-
C <sub>3</sub> , %vol		Max. 0,8		-
C <sub>4</sub> , %vol	ASTMD-2163	Min. 97,0	Min. 95	Min. 97,5
C <sub>5</sub> , %vol				Max. 15
C <sub>6+</sub> , %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)

## 2.6 Dasar Termodinamika Pada *Boiler*

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 konveksi energi (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

### 2.6.1 Hukum Termodinamika I

Hukum Termodinamika I merupakan penerapan kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, meskipun energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya dengan total energinya sama. Bila diberikan panas ( $dQ$ ) pada suatu sistem, maka sistem akan berekspansi dan melakukan kerja sebesar ( $dW$ ) dan menimbulkan penambahan kecepatan molekul dari sistem serta pertambahan jarak antara molekul-molekul dari sistem karena sistem berekspansi. Energi total dari suatu sistem disebut sebagai energi dalam ( $U$ ). Energi dalam adalah sifat keadaan, artinya nilai energi dalam bergantung hanya pada keadaan akhir sistem dan tidak bergantung pada cara pencapaian keadaan itu. Energi dalam mempunyai dua sifat lebih lanjut, yaitu:

- a) 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.
- b) Sifat kedua energi dalam adalah perpindahan energi (karena kita dapat melihat apakah beban dinaikkan atau diturunkan dalam lingkungannya, atau apakah es sudah meleleh). Kalor dan kerja adalah cara dalam mengubah energi sistem.

Kedua sifat energi ini diringkas menjadi pernyataan yang disebut hukum pertama termodinamika yaitu energi dalam suatu besarnya tetap kecuali jika diubah dengan melakukan kerja atau pemanasan (Atkins, 1999). Sesuai dengan hukum ini, energi yang diberikan oleh panas harus sama dengan kerja eksternal yang dilakukan ditambah dengan perolehan energi dalam karena kenaikan temperatur.

Secara matematis dapat dilihat pada Persamaan (1) (Daryus, 2007):

$$Q = \Delta U + W \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

Q : kalor yang dipindahkan

$\Delta U$  : perubahan energi dalam

W : kerja yang dilakukan dalam satuan kalor

### 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

$$\Delta S_{tot} \geq \dots\dots\dots(2)$$

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuai 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:

$$dS = \frac{dQ}{T} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana  $dQ$  mewakili perpindahan kalor pada batas sistem selama terjadinya siklus,  $T$  merupakan 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 merupakan 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).

### 2.7 Flame Temperatur

Temperatur nyala (*Flame Temperatures*) adalah suhu maksimum nyala bahan bakar yang terjadi apabila tidak ada kebocoran panas ke sekelilingnya. Suhu nyala adibatik diperlukan untuk mengetahui berapa besar panas yang terjadi ketika bahan bakar tersebut dibakar. Hal ini merupakan salah satu parameter karakteristik *termal* dari bahan bakar, seperti halnya bahan bakar LPG yang dipakai sebagai bahan bakar.

Perhitungan suhu nyala *adibatik* didasarkan atas persentase massa dari kandungan *carbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen* di dalam bahan bakar. Dalam pembakaran, semua *kalor* yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi *kalor produk + kalor sensibel*. *Flame temperatur* adalah temperatur dimana suatu zat atau material melepaskan uap yang cukup untuk membentuk campuran dengan udara yang ada sehingga terbakar.

Walaupun banyak orang yang mengatakan bahwa temperatur nyala tidak dapat di tentukan secara nyata. Karena hal itulah para ahli mencari metode untuk menentukan nilainya secara teori. Temperatur nyala api ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu tergantung pada jenis bahan bakar dan oksida yang digunakan. Untuk api konvensional yang digunakan dalam fotometri nyala, temperatur nyala yang lebih tinggi diperoleh dengan oksigen digunakan sebagai oksida bukan udara,

karena didalam udara terdapat nitrogen yang dapat menurunkan suhu nyala api (Melisa, 2015).

*Flame temperatur* juga bervariasi sesuai dengan rasio masing-masing komponen dalam campuran yang mudah terbakar. jika campuran tidak masuk pembakaran dalam komposisi optimal, bahan bakar kelebihan atau oksidan tidak berpartisipasi dalam reaksi dan gas inert seperti komponen berlebih menurunkan suhu nyala api. Temperatur yang di dapat secara *adiabatik*, dimana tidak ada panas yang masuk dan panas yang keluar pada saat terjadinya pembakaran. Sedangkan, suhu pembakaran disebut dengan *flame temperatur*.

Faktor-faktor yang mempengaruhi *flame temperatur* :

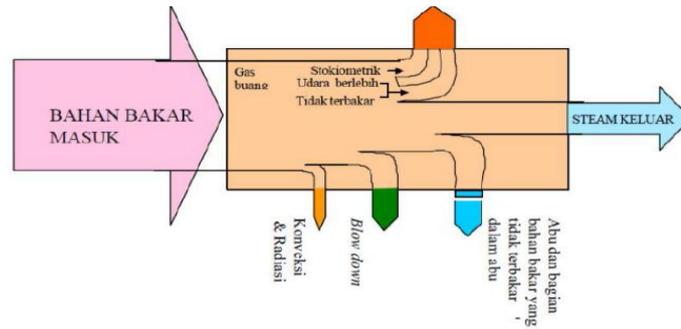
1. Temperatur Adiabatik
2. Tekanan *Atmosfir*
3. Bahan bakar yang terbakar
4. Ada tidaknya pengoksidasi dalam bahan bakar
5. Bagaimana *stokiometri* pembakaran yang terjadi

## **2.8 Efisiensi Boiler**

Efisiensi termal *boiler* didefinisikan sebagai persen energi (panas) masuk yang digunakan secara efektif pada *steam* yang dihasilkan. Efisiensi *boiler* dinyatakan sebagai perbandingan panas sebenarnya yang digunakan untuk memanaskan air dan pembentukan uap terhadap panas hasil pembakaran bahan bakar di dalam dapur.

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 LNG) menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi jika dibandingkan bahan bakar padat seperti batubara. Proses pembakaran pada *boiler* tidak mungkin berlangsung secara sempurna mengingat adanya panas yang hilang selama proses pembakaran terjadi, seperti panas yang terbuang melalui *stack* atau cerobong asap, *blowdown*, dan kehilangan panas di permukaan *boiler* (Sugiharto 2020).

Untuk diagram sankey dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Diagram sankey

Terdapat dua metode pengkajian efisiensi *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*).

Parameter yang dipantau untuk perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung, yaitu :

- Jumlah *Steam* yang dihasilkan per jam (Q) dalam Kg/jam
- Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam(Q) dalam kg/jam
- Tekanan kerja dalam (kg/cm<sup>2</sup>)
- Suhu air umpan (°C)
- Jenis bahan bakar dan nilai panas kotor bahan bakar (GCV) dalam kkal/kg bahan bakar

(Widiatmini Sih Winanti dan Teguh Prayudi, 2006)

Rumusan sederhana dari perhitungan metode langsung adalah sebagai berikut:

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

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

Dimana:

$\eta_{fuel}$  : Efisiensi bahan bakar boiler (%)

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

- Q : Debit uap air keluar boiler (kg/jam)
- hg : Entalpi uap keluar boiler (kcal/kg)
- hf : Entalpi air masuk boiler (kcal/kg)
- Qfuel : 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)
- (Sugiharto Agus, 2020, PPSDM MIGAS, Cepu.)*