

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu zat yang jika dipanaskan akan mengalami reaksi kimia dengan oksidator (biasanya oksigen dalam udara) untuk melepaskan panas. Bahan bakar komersial mengandung karbon, hidrogen, dan senyawa-senyawanya. Sehingga sering disebut bahan bakar hidrokarbon yang akan menghasilkan suatu nilai kalor (*heating value*).

2.2.1 Solar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar minyak nabati 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 (diatas 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:

1. Warna sedikit kekuningan dan berbau
2. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
3. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
4. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
5. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
6. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
7. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.

Tabel 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 suhu 15 ⁰ C)	Kg/m ³	820	860	D 445 – 97
3	Viskositas (pada suhu 15 ⁰ C)	mm ² /s	2	4,5	D 445 – 97
4	Kandungan Sulfur	% mm	-	0,05	D 2622 – 98
5	Distilasi				
	T 90	°C	-	340	
	T 95	°C	-	360	
	Titik Didih Akhir	°C	-	370	
6	Titik Nyala	°C	55	-	D 93 799c
7	Titik Tuang	°C	-	18	D 97
8	Residu Karbon	% mm	-	0,30	D 4530 – 93
9	Kandungan Air	mg/kg	-	500	D 1744 – 92
10	Stabilitias Osidasi	g/m ³	-	25	D 2274 – 94
11	Titik Nyala	°C	55	-	D 93 799c
12	Titik Tuang	°C	-	18	D 97
13	Residu Karbon	% mm	-	0,30	D 4530 – 93

(Sumber : Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi (2006))

2.2 Burner

Burner adalah alat untuk mensuplai udara dan bahan bakar ke dalam suatu daerah pembakaran, sehingga bisa terjadi reaksi pembakaran. Proses pembakaran pada mesin tenaga uap terjadi pada *furnace*. Pada *furnace* terdapat *burner*. *Furnace* ditempatkan menyatu dengan *boiler* dan terpisah dengan fluida kerja air yang mengalir pada pipa-pipa *boiler*. Pada burner sangat diharapkan terjadi pembakaran yang sempurna untuk itu diperlukan beberapa faktor, antara lain :

1. Nyala api yang stabil
2. Pembakaran yang lengkap
3. Pengontrolan yang baik

Berdasarkan dari jenis bahan bakar yang digunakan, *burner* diklasifikasikan menjadi tiga yaitu:

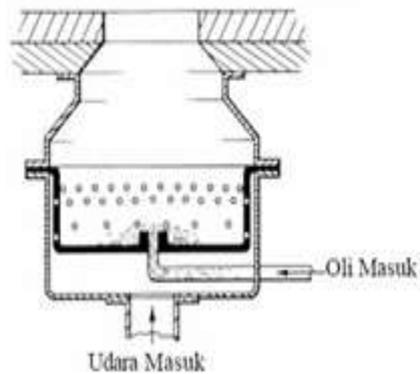
1. *Burner* untuk bahan bakar cair
2. *Burner* untuk bahan bakar gas
3. *Burner* untuk bahan bakar padat.

2.2.1 Liquid Fuel Burner

Burner dengan berbahan bakar cair mempunyai permasalahan khusus yaitu proses *mixing* antara bahan bakar cair dan udara. Untuk memperbaiki pencampuran bahan bakar udara, proses pengkabutan harus menjamin terjadi atomisasi yang bagus dari bahan bakar sehingga udara dapat berdifusi dengan mudah masuk ke bahan bakar. Dari proses tersebut akan tercapai campuran yang lebih homogen. Proses pembakaran akan berlangsung menjadi lebih sempurna. Ada beberapa macam tipe dari burner berbahan bakar cair yaitu sebagai berikut :

a. Vaporising Burner

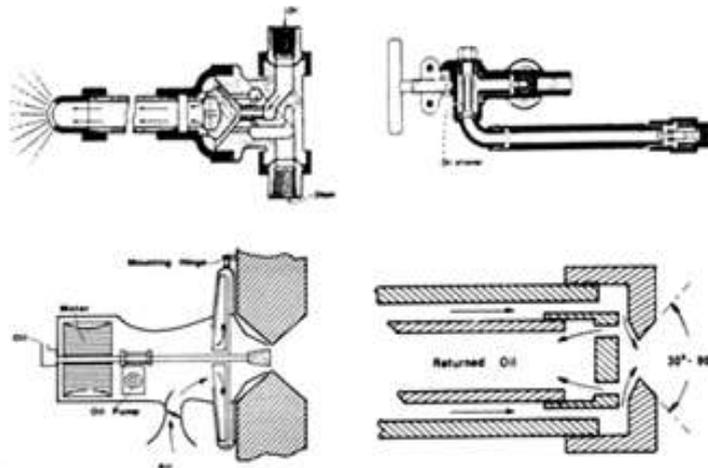
Burner jenis ini menggunakan bahan bakar cair seperti kerosene dan premium. Bahan-bakar diuapkan terlebih dahulu sebelum bercampur dengan udara. Udara didifusikan ke uap bahan-bakar secara alamiah atau dipaksa dengan fan. Burner tipe ini digunakan pada industri-industri skala kecil.



Gambar 1. Vaporising Burner

b. Atomizer Burner

Proses pengkabutan dari burner model ini dibantu dengan fluida bertekanan, dimana pada waktu proses pengkabutan fluida mempunyai energi kinetik tinggi ke luar dari nosel. Fluida yang sering dipakai adalah udara atau uap bertekanan. Penggunaan uap dianggap lebih menguntungkan. Bahan bakar disemprotkan dengan tekanan tinggi, uap dengan tekanan sedang akan membantu proses pemecahan bahan bakar menjadi droplet, sehingga pengkabutan lebih bagus.



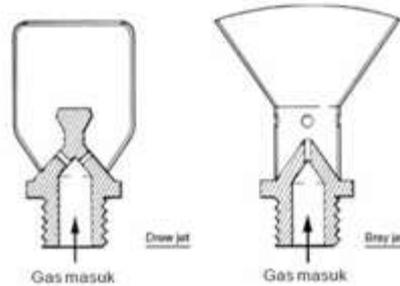
Gambar 2. Atomizer Burner

2.2.2 Gas Fuel Burner

Proses pembakaran bahan bakar gas tidak memerlukan proses pengkabutan atau atomisasi, bahan bakar langsung berdifusi dengan udara. Ada dua tipe yaitu :

a. Non Aerated Burner

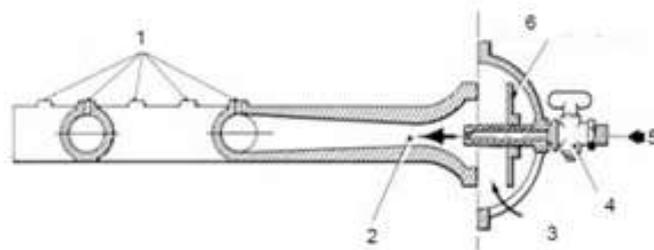
Tipe ini bahan bakar gas dan udara tidak dicampur dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Bahan bakar gas bertekanan dilewatkan melalui nosel, udara akan berdifusi secara alamiah dengan bahan bakar. Proses pembakaran dengan burner tipe ini dinamakan pembakaran difusi. Dua contoh burner tipe ini yang biasa dipakai dapat dilihat pada gambar.



Gambar 3. Non Aerated Burner

b. Aerated Burner.

Bahan bakar gas dan udara dicampuri dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Pada burner tipe ini selalu ada pengaman untuk mencegah nyala balik ke sumber campuran bahan bakar udara. Jenis burner ini yang paling umum adalah model Bunsen.



No	Nama komponen
1	lubang burner
2	venturi
3	udara masuk
4	katup kontrol
5	gas (bahan bakar) masuk
6	plat pengatur pengkabutan

Gambar 4. Aerated Burner

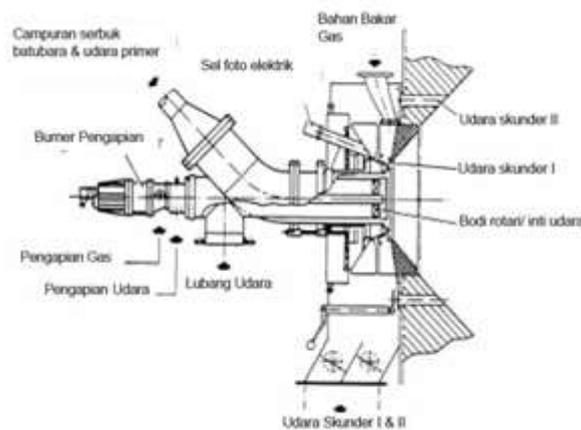
2.2.3 Solid Fuel Burner

Bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang sangat berlimpah di alam. Bahan bakar ini harus melalui proses yang lebih rumit daripada jenis bahan bakar lainnya untuk terbakar. Bahan bakar padat mengandung air, zat terbang, arang karbon dan abu. Air dan gas terbang yang mudah terbakar harus diuapkan dulu melalui proses pemanasan sebelum arang karbon terbakar.

Bahan bakar padat banyak dipakai sebagai sumber energi pada mesin tenaga uap. Bahan bakar tersebut dibakar di *furnace* dengan *stoker* atau *burner*. Ada beberapa tipe *burner* atau *stoker* yang dipasang di *furnace* sebagai berikut:

a. Pulverized Fuel Burner

Bahan bakar padat akan dihancurkan lebih dahulu dengan alat *pulverized* sampai ukuran tertentu sebelum dicampur dengan udara. Selanjutnya campuran serbuk batu bara dan udara diberi tekanan kemudian disemprotkan menggunakan *diffuser*. Proses pembakaran dibantu dengan penyalaan dengan bahan bakar gas atau cair untuk menguapkan air dan zat terbang. Udara tambahan diperlukan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien.

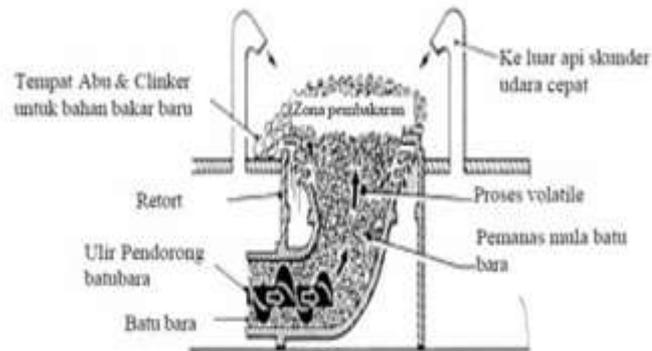


Gambar 5. Pulverized fuel burner

b. Underfeed Stoker

Stoker jenis ini banyak dipakai untuk industri skala kecil, konstruksinya sederhana. Bahan bakar di dalam berupa batu bara dimasukkan ke perapian dengan *screw* pengumpan. Proses pembakaran terjadi di dalam *retort*, batu bara akan dipanaskan untuk menguapkan air dan zat terbang kemudian arang

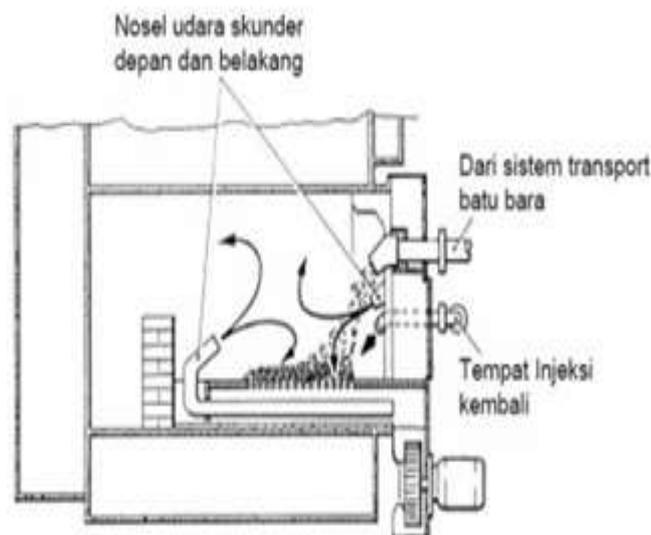
terbakar. Sisa pembakaran berupa abu akan digeser ke luar karena desakan batu bara baru yang belum terbakar. Udara tambahan digunakan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien.



Gambar 6. Underfeed Stoke

c. Fixed Grate Burner

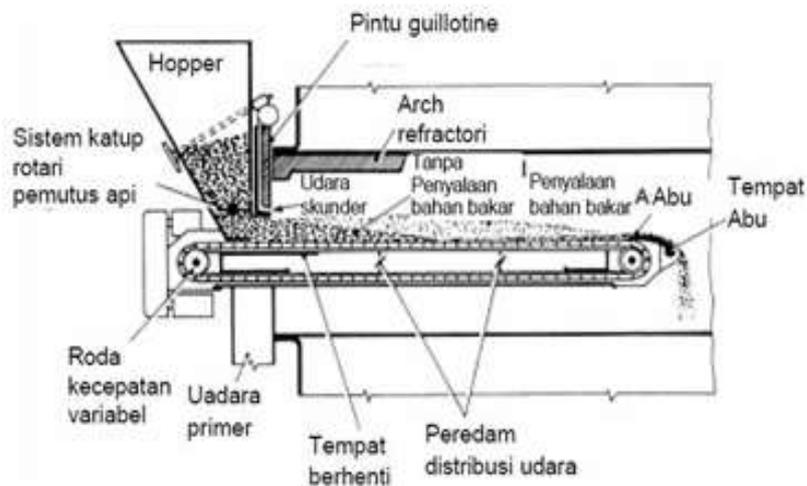
Tempat pembakaran berbentuk plat yang memungkinkan udara utama dapat mengalir dari bawah. Serbuk batu bara dari pulvizer dipindahkan menuju burner dengan udara berkecepatan sedang dengan pipa pengumpan. Proses pembakaran dibantu dengan udara tambahan dari saluran saluran udara sekunder. Ada dua tipe yang umum dipakai yaitu front feed dan top feed fixed grate burner. Sisa pembakaran yang berupa abu dibersihkan secara manual atau dirancang secara otomatis.



Gambar 7. Fixed Grate Burner

d. *Chain Grate Stoker*

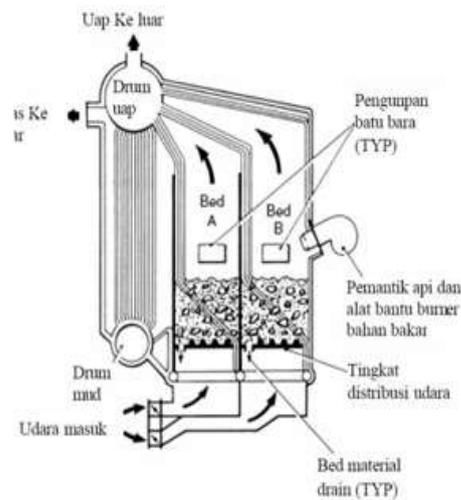
Serbuk batubara diumpangkan dari hopper dengan katup rotari ke grate berjalan, kapasitasnya dibatasi dengan menggunakan plat geloutin. Rotari vane juga digunakan untuk mencegah nyala balik dari grate berjalan ke hopper. Grate berjalan dapat divariasi kecepatannya. Udara pembakaran dilewatkan dari sela-sela grate dan udara tambahan dilewatkan melalui permukaan atas lapisan serbuk batu bara pada grate.



Gambar 8. *Chain Grate Stoker*

e. *Fluidized Bed Stoker*

Bahan bakar berupa serbuk batu bara dikondisikan seperti fluida. Serbuk batubara terangkat dari grate karena desakan dari udara bertekanan dari bagian bawah grate. Udara bertekanan disuplai dari kompresor. Proses pembakaran terjadi sangat cepat, dibantu dengan penyalaan dengan bahan bakar gas atau cair. Temperatur pembakaran tidak boleh melebihi dari temperatur leleh dari abu, sehingga tidak terjadi penyumbatan di grate oleh lelehan dari abu. Abu akan turun ke penampung abu di bagian bawah. Serbuk batu bara diumpangkan dari feeder. Untuk mencegah emisi gas ke luar ditambahkan limestone atau zat lainnya untuk menetralkan zat polusi seperti sulfat dan nitrat.



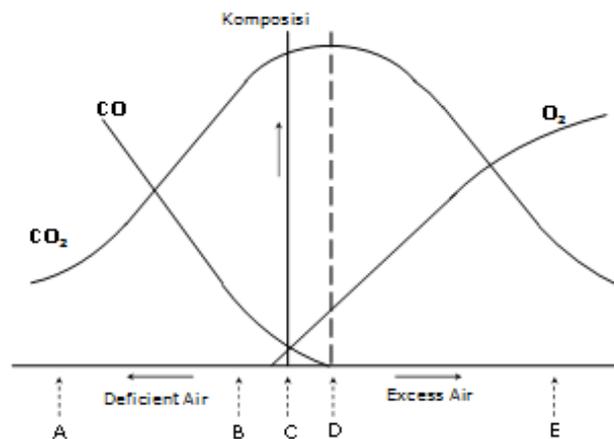
Gambar 9. Fluidized Bed Stoker

2.3 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 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.

2.3.1 Profil Pembakaran

Mengetahui komposisi gas buang melalui pengukuran berguna untuk dapat mengerti dengan baik proses pembakaran yang terjadi dalam suatu *boiler* atau *furnace*.



Gambar 10. Profil Pembakaran Bahan Bakar

Pada gambar profil pembakaran bahan bakar hubungan antara udara berlebih dengan gas-gas hasil pembakaran dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada laju udara dibawah kebutuhan teoritisnya (titik A), semua karbon dalam bahan bakar tidak semuanya diubah menjadi CO_2 , tetapi lebih banyak CO yang dihasilkan.
2. Dengan menambah udara (titik B), sebagian CO diubah menjadi CO_2 dengan melepas lebih banyak panas. Komposisi CO dalam gas buang turun tajam dan CO_2 meningkat.
3. Pada titik dimana udara stoikiometrik terpenuhi (titik C), semua karbon dapat seluruhnya diubah menjadi CO_2 pada system ideal. Kondisi ini tidak pernah dapat dicapai.
4. Operasi pembakaran normal (titik D) pada prakteknya dapat dicapai dengan menambah sedikit udara diatas kebutuhan stoikiometrinya (*excess air*) untuk mencapai pembakaran lengkap. Pada kondisi ini, CO_2 pada level maksimumnya, dan produksi CO pada level minimumnya dalam gas buang. Pembakaran paling efisien.
5. Semakin banyak udara ditambahkan (titik E), level CO_2 kembali turun karena bercampur dengan udara lebih. Udara lebih yang tinggi juga merugikan karena menurunkan temperature pembakaran dan menyerao panas berguna dalam gas buang.

2.3.2 Manajemen Pembakaran

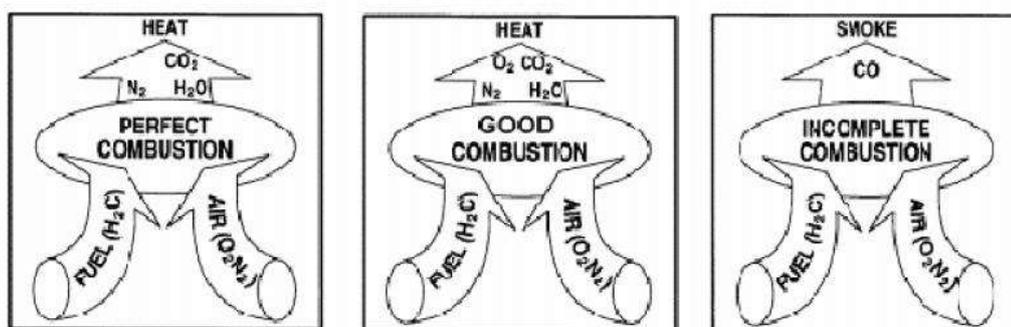
Pembakaran dengan ratio udara maksimum atau *Excess air* bisa mengakibatkan kerugian panas sensibel di *flue gas* dan apabila ratio udara rendah bisa mengakibatkan pembakaran yang tidak sempurna dan menyebabkan terbentuknya gas CO. Untuk menjaga ratio udara yang optimum harus menjaga infiltrasi udara. Infiltrasi udara lewat celah-celah ruang bakar bisa menyebabkan kerugian energi karena udara tersebut tidak ikut terbakar dalam proses pembakaran bahkan menyebabkan panas yang dihasilkan terserap dari proses pembakaran. Kemudian infiltrasi lewat celah-celah pada cerobong menyebabkan pengukuran komposisi dan temperatur gas buang menjadi tidak akurat sehingga perhitungan efisiensinya tidak akurat.

Kemudian menjaga agar kapasitas burner sesuai dengan beban supaya diperoleh nyala api yang sesuai sehingga perpindahan panasnya optimum. Nyala api yang optimum dapat diperoleh apabila kecepatan udara optimum dapat dipenuhi. Dan yang terakhir adalah mengontrol polusi atau gas yang dihasilkan oleh pembakaran.

2.3.3 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)



Gambar 11. Pembakaran yang Sempurna, yang Baik, dan Tidak Sempurna

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.

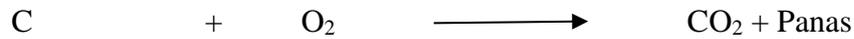
Pada proses pembakaran dengan proses penyalaan api yang normal, dibutuhkan tiga komponen utama untuk tercapainya suatu fase pembakaran, yaitu panas, bahan bakar, dan oksigen. Ketiganya merupakan elemen-elemen yang harus ada untuk mewujudkan terjadinya proses pembakaran, sehingga jika salah satu elemen 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, vaporisasi dari bahan bakar cairan hanya akan terjadi pada tingkat temperature permukaan tertentu dari cairan itu sendiri.

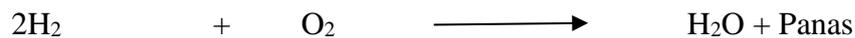
Selanjutnya, uap hasil vaporasi tersebut akan bercampur dengan oksigen yang terkandung di dalam udara (*oxidizer*) untuk membentuk campuran yang dapat terbakar. Setelah bahan bakar berubah fase menjadi gas dan bersifat mudah terbakar (*volatile*), bahan bakar akan dengan mudah bercampur dengan udara 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*.

2.3.4 Reaksi Pembakaran

Hasil utama pembakaran adalah CO₂ dan disertai energi panas. Selain itu pembakaran juga menghasilkan CO, sulfur, abu, NOX tergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan. Dibawah merupakan reaksi pembakaran :



Dari bahan bakar Dari udara



Dari bahan bakar Dari udara

Pada pembakaran stokiometri, ketika karbon terbakar dengan oksigen, maka reaksi utama akan menghasilkan karbondioksida, air, nitrogen dan beberapa gas lainnya (kecuali oksigen).

2.3.5 Pembakaran Bahan Bakar

Pembakaran merupakan reaksi kimia, yaitu elemen tertentu dari bahan bakar setelah dinyalakan dan digabung dengan oksigen akan menimbulkan panas sehingga menaikkan suhu dan tekanan gas. Elemen mampu bakar (*combustable*) yang utama adalah karbon (C) dan hidrogen (H), elemen mampu bakar yang lain umumnya hanya sedikit terkandung dalam bahan bakar adalah sulfur (S). Oksigen yang diperlukan untuk pembakaran diperoleh dari udara yang merupakan campuran dari oksigen dan nitrogen.

Nitrogen adalah gas lembam dan tidak berpartisipasi dalam pembakaran. Selama proses pembakaran, butiran minyak bahan bakar dipisahkan menjadi elemen komponennya yaitu hidrogen dan karbon yang masing-masing bergabung dengan oksigen dari udara secara terpisah. Hidrogen bergabung dengan oksigen untuk membentuk air dan karbon bergabung dengan oksigen menjadi karbondioksida. Jika oksigen yang tersedia tidak cukup, maka sebagian dari karbon akan bergabung dengan oksigen dalam bentuk karbon monoksida. Pembentukan karbon monoksida hanya menghasilkan 30% panas dibandingkan panas yang timbul oleh pembentukan karbondioksida.

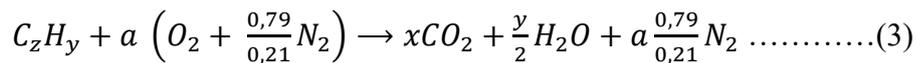
Perbandingan jumlah udara dengan bahan bakar disebut dengan *Air Fuel Ratio* (AFR). Perbandingan ini dapat dibandingkan baik dalam jumlah massa ataupun dalam jumlah volume.

$$\text{AFR} = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{V_{fuel}}{V_{air}} \dots\dots\dots(1)$$

Besarnya AFR dapat diketahui dari uji coba reaksi pembakaran yang benar-benar terjadi, nilai ini disebut AFR aktual. Sedangkan AFR lainnya adalah AFR stoikiometri, merupakan AFR yang diperoleh dari persamaan reaksi pembakaran. Dari perbandingan nilai AFR tersebut dapat diketahui nilai rasio ekuivalen (ϕ) :

$$\phi = \frac{\text{AFR}_{sto}}{\text{AFR}_{akt}} \dots\dots\dots(2)$$

Untuk dapat mengetahui nilai AFR, maka harus dihitung jumlah keseimbangan atom C,H, dan O dalam suatu reaksi pembakaran. Adapun rumus umum reaksi pembakaran yang menggunakan udara kering adalah:



2.3.6 Nilai Kalor Bahan Bakar

Reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen dari udara menghasilkan panas. Besarnya panas yang timbulkan jika satu satuan bahan bakar dibakar sempurna disebut nilai kalor bahan bakar (*Calorific Value*). Berdasarkan asumsi ikut tidaknya panas laten pengembunan uap air dihitung sebagai bagian dari nilai kalor suatu bahan bakar, maka nilai kalor bahan bakar dapat dibedakan menjadi nilai kalor atas dan nilai kalor bawah.

Nilai kalor atas (*High Heating Value*) merupakan nilai kalor yang diperoleh secara eksperimen dengan menggunakan calorimeter dimana hasil pembakaran bahan bakar didinginkan sampai suhu kamar sehingga sebagian besar uap air yang terbentuk dari pembakaran hydrogen mengembun dan melepaskan panas latennya. Secara teoritis, besarnya nilai kalor atas (HHV) dapat dihitung bila diketahui komposisi bahan bakar dengan menggunakan persamaan *Dulong*:

$$\text{HHV} = 33950 + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

HHV = Nilai kalor atas (kJ/kg)

C = Persentase karbon dalam bahan bakar

- H₂ = Persentase hidrogen dalam bahan bakar
 O₂ = Persentase oksigen dalam bahan bakar
 S = Persentase sulfur dalam bahan bakar

Nilai kalor bawah (*Low Heating Value*) merupakan nilai kalor bahan bakar tanpa panas laten yang berasal dari pengembunan uap air. Umumnya kandungan hidrogen dalam bahan bakar cair berkisar 15% yang berarti setiap satu satuan bahan bakar dan 0,15 bagian merupakan hidrogen. Pada proses pembakaran sempurna, air yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar adalah setengah dari jumlah mol hidrogennya.

Selain berasal dari pembakaran hidrogen, uap air yang terbentuk pada proses pembakaran dapat pula berasal dari kandungan air yang memang sudah ada didalam bahan bakar (*moisture*). Panas laten pengkondensasian uap air pada tekanan parsial 20 kN/m² (tekanan yang umum timbul pada gas buang) adalah sebesar 2400 kJ/kg, sehingga besarnya nilai kalor bawah (LHV) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9 H_2) \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

LHV = Nilai kalor bawah (kJ/kg)

M = Persentase kandungan air dalam bahan bakar (*moisture*)

Dalam perhitungan efisiensi panas dari mesin bakar, dapat menggunakan nilai kalor bawah (LHV) dengan asumsi pada suhu tinggi saat gas buang meninggalkan mesin tidak terjadi pengembunan uap air. Namun dapat juga menggunakan nilai kalor atas (HHV) karena nilai tersebut umumnya lebih cepat tersedia. Peraturan pengujian berdasarkan ASME (*American of Mechanical Engineers*) menentukan penggunaan nilai kalor atas (HV), sedangkan peraturan SAE (*Society of Automotive Engineers*) menentukan penggunaan nilai kalor bawah (LHV).

2.3.7 Udara Pembakaran

Salah satu faktor dalam terjadinya pembakaran adalah udara. Dalam keadaan udara kering komposisi unsur – unsur gas yang terdapat pada atmosfer terdiri atas unsur nitrogen (N_2) 78%, oksigen (O_2) 21%, karbondioksida (CO_2) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O_3), hidrogen (H_2), helium (He), neon (Ne), xenon (Xe), krypton (Kr), radon (Rn), metana, dan ditambah unsur uap air dalam jumlah yang berbeda-beda sesuai dengan ketinggian tempat. Kelembaban Udara (*Humidity*) adalah jumlah uap air di udara (atmosfer). Kelembaban adalah konsentrasi uap air di udara. Angka konsentrasi ini dapat diekspresikan dalam kelembaban absolut, kelembaban spesifik atau kelembaban relatif. Selain itu, kelembaban udara adalah tingkat kebasahan udara karena dalam udara, air selalu terkandung dalam bentuk uap air. Kandungan uap air dalam udara panas lebih banyak daripada kandungan uap air dalam udara dingin. Jika udara banyak mengandung uap air didinginkan maka, suhunya turun dan udara tidak dapat menahan lagi uap air sebanyak itu. Uap air berubah menjadi titik – titik air. Udara yang mengandung uap air sebanyak yang dapat dikandungnya disebut udara jenuh.

Dapat dianalogikan dengan sebuah termometer dan termostat untuk suhu udara. Perubahan tekanan sebagian uap air di udara berhubungan dengan perubahan suhu. Konsentrasi air di udara pada tingkat permukaan laut dapat mencapai 3% pada $30^\circ C$ ($86^\circ F$) dan tidak melebihi 0,5% pada $0^\circ C$ ($32^\circ F$). Ada dua istilah kelembaban udara yaitu kelembaban tinggi dan kelembaban rendah. Kelembaban tinggi adalah jumlah uap air yang banyak di udara, sedangkan kelembaban rendah adalah jumlah uap air yang sedikit di udara.

Kelembaban udara dapat dinyatakan sebagai kelembaban udara absolut, kelembaban nisbi (relatif), maupun defisit tekanan uap air. Kelembaban absolut adalah kandungan uap air yang dapat dinyatakan dengan massa uap air atau tekanannya per satuan volume (kg/m^3). Kelembaban nisbi (relatif) adalah perbandingan kandungan (tekanan) uap air actual dengan keadaan jenuhnya (g/kg). defisit tekanan uap air adalah selisih antara tekanan uap jenuh dengan tekanan uap aktual.

Kelembaban nisbi (RH) mempunyai dua pengertian, yaitu:

- a. Perbandingan jumlah uap air yang secara aktual dengan jumlah uap air maksimum yang mampu dikandung oleh setiap unit volume udara dalam suhu yang sama. Untuk mencari kelembaban nisbi digunakan rumus sebagai berikut:

$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P^*_{H_2O}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

RH adalah kelembaban relatif campuran,

P_(H₂O) adalah tekanan parsial uap air dalam campuran,

P*_(H₂O) adalah tekanan uap jenuh air pada temperatur tersebut dalam campuran.

- b. Banyaknya tekanan uap yang ada secara aktual dengan tekanan uap maksimum pada suhu yang sama. Seperti kelembaban spesifik yaitu banyaknya uap air yang terkandung dalam 1 kg udara.

2.3.8 Rasio Udara dan Udara Berlebih

Pada suatu reaksi pembakaran berlangsung dapat diketahui dari angka perbandingan antara jumlah udara actual dengan jumlah udara teoritisnya atau melihat seberapa besar kelebihan udara actual dari kebutuhan udara teoritisnya (dalam %), hal ini bertujuan untuk menilai efisiensi dari suatu proses pembakaran.

Untuk mengetahui jumlah udara actual harus diketahui kandungan O atau CO₂ dalam gas buang (% volume, basis kering) melalui pengukuran, sedangkan udara teoritis tergantung bahan bakar yang digunakan. Rasio udara dan udara berlebih dapat diketahui sebagai berikut :

$$\text{Rasio Udara} = \frac{(\text{Jumlah Udara Pembakaran aktual})}{(\text{Jumlah Udara pembakaran teoritis})} = \frac{(21)}{(21 - \%O_2)} \dots\dots\dots(7)$$

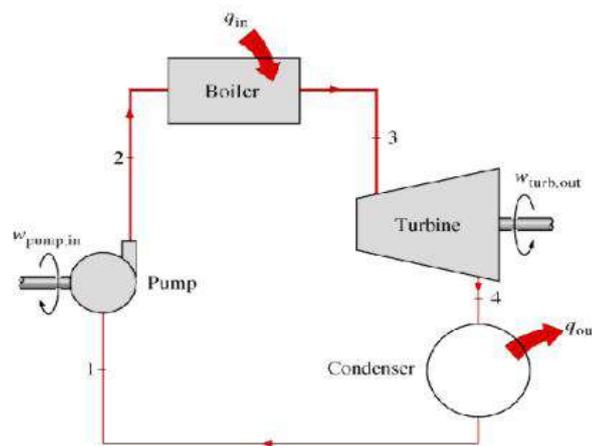
$$\% \text{ Excess air} = \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \times 100 \% \dots\dots\dots(8)$$

Jumlah udara actual tergantung pada beberapa faktor antara lain :

1. Jenis bahan bakar dan komposisinya
2. Desain ruang bakar (Furnace)
3. Kapasitas pembakaran (*Firing Rate*) Optimum 70 – 90 %
4. Desain dan pengaturan burner.

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Siklus Rankine

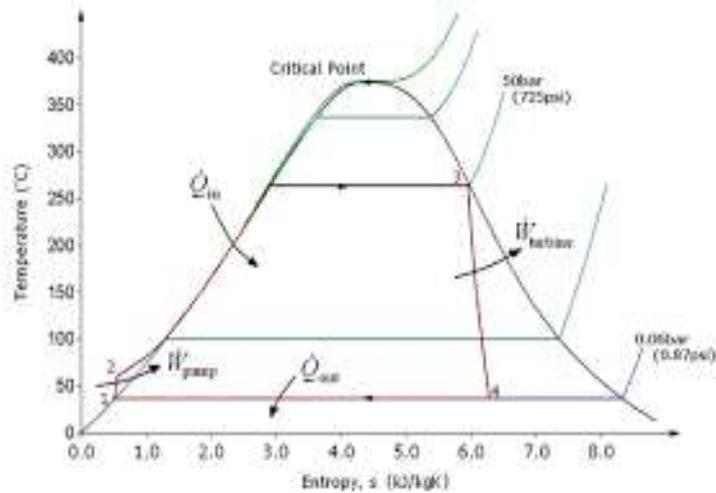
Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), dan gas. Konversi energi tingkat pertama yang terjadi di pembangkit listrik tenaga uap adalah konversi energi primer menjadi energi panas (Kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar dari ketel uap PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada dalam *steam drum*. Uap dari *steam drum* dialirkan ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator, dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator (Marsudi, 2005). Secara skematis proses pembangkit listrik tenaga uap dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Siklus Rankine, atau siklus tenaga uap, merupakan siklus teoritis paling sederhana yang menggunakan uap sebagai medium kerja sebagaimana dipergunakan pada PLTU. Siklus Rankine berbeda dengan siklus-siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal. Siklus Rankine ideal dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Siklus Rankine Sederhana

Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

- 1 – 2 Kompresi isentropik dengan pompa
- 2 – 3 Penambahan panas dalam boiler secara isobar
- 3 – 4 Ekspansi isentropik pada turbin
- 4 – 1 Pelepasan panas pada kondenser secara isobar dan isotermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh *boiler* ke air pada tekanan yang tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai *steam generator*. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperatur dari steam akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondenser dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondenser dan akan meninggalkan kondenser sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini (Cengel dan Boles, 1994).

Efisiensi Termal Siklus

Efisiensi termal mengukur seberapa banyak energi yang masuk kedalam fluida kerja pada *boiler* yang dikonversi menjadi keluaran kerja netto. Secara matematis dapat dihitung dengan Persamaan 9.

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_H} \dots\dots\dots(9)$$

Q_H merupakan kalor masukan yang dikonversikan menjadi kerja berguna plus kalor yang keluar pada suhu rendah, dimana:

$$Q_H = W + Q_C \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{Jadi, } W = Q_H - Q_C \dots\dots\dots(11)$$

Berbagai efisiensi tertinggi akan dicapai apabila Q_C dapat dibuat kecil. Jadi yang diinginkan adalah untuk memasukkan energi sebagai panas pada temperatur setinggi mungkin dan membuang energi sebagai panas pada temperatur serendah mungkin (Giancoli, 1997; Reynolds dan Perkins, 1977).

2.5 Ketel Uap (*Boiler*)

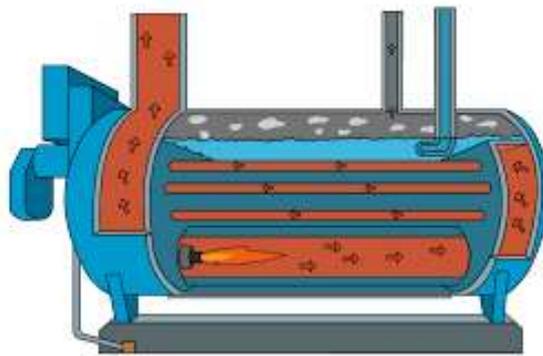
Ketel Uap (*boiler*) merupakan mesin kalor (*thermal engineering*) yang mentransfer energi-energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha) (Muin, 1988). *Boiler* adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan *steam*. *Steam* diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin, 2009). *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar. Sistem *boiler* terdiri dari: sistem air umpan (*feed water system*), sistem steam (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*). Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem *steam* (*steam sistem*) mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam *boiler*. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem

bahan bakar (*fuel sistem*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan (Febriana, 2008).

2.5.1 Jenis-Jenis *Boiler* Berdasarkan Tipe Pipa

a. Ketel Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Pada ketel pipa api (*fire tube boiler*), nyala api dan gas panas yang dihasilkan pembakaran, mengalir melalui pipa yang dikelilingi oleh air. Panas dikonduksikan melalui dinding pipa dari gas panas ke air di sekeliling pipa tersebut. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dan Karnowo, 2008). Untuk lebih jelasnya, *fire tube boiler* dapat dilihat pada Gambar 14



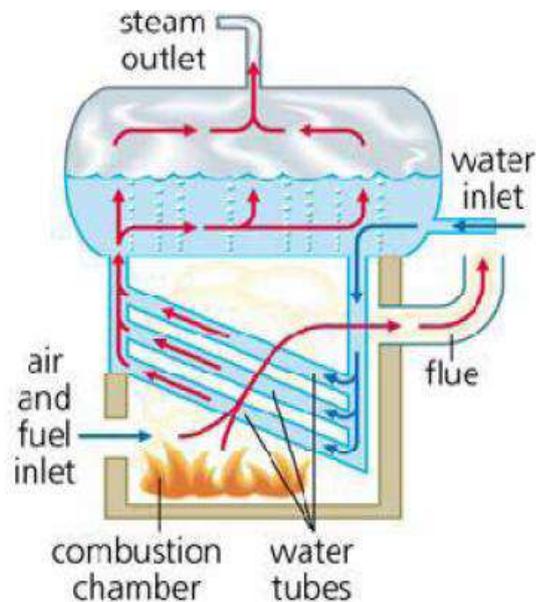
Gambar 14. *Fire Tube Boiler*

Sebagai pedoman, *fire tube boiler* kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boiler* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar *fire tube boiler* dikonstruksi sebagai “paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar (UNEP, 2006).

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

Ketel pipa air (*water tube boiler*) banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari *water tube boiler* berkebalikan dengan *fire tube boiler*, gas pembakaran dari *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan

diapkan (Raharjo dan Karnowo 2008). Untuk lebih jelasnya, boiler pipa api dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Water Tube Boiler

Boiler ini dipilih jika kebutuhan *steam* dan tekanan *steam* sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga. *Water tube boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas steam antara 4.500 – 12.000 kg/jam, dengan tekanan sangat tinggi. Banyak *water tube boilers* yang dikonstruksi secara paket jika digunakan bahan bakar minyak bakar dan gas (UNEP, 2006).

2.5.2 Sistem Pengoperasian Boiler

Panas pembakaran yang dihasilkan dari pengoperasian *boiler* dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau *steam*. *Steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air dididihkan sampai menjadi *steam*, volumenya akan meningkat sekitar 1.600x, menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga *boiler* merupakan peralatan yang dikelola dan dijaga dengan sangat baik.

Sistem *boiler* terdiri dari sistem air umpan, sistem *steam*, dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Sebagai kran (*valve*) disediakan untuk mempermudah

pengaturan produksi *steam* dalam *boiler*. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem. Air yang disuplai ke *boiler* untuk diubah menjadi *steam* disebut air umpan. Untuk mendapatkan efisiensi *boiler* yang lebih tinggi, digunakan ekonomiser untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang pada cerobong (*stack*). (UNEP, 2006).

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pengoperasian *boiler*:

1. Tekanan *Boiler*

Tekanan merupakan faktor penting dalam proses *boiler*. Tekanan proses yang diinginkan harus dijaga untuk menjamin kebutuhan *steam* sesuai tekanan yang dibutuhkan. Untuk mendapatkan energi yang sesuai dengan kebutuhan turbin agar dapat menggerakkan generator, maka tekanan uap panas kering yang dihasilkan pun harus sesuai dengan kebutuhan beban. Dalam hal ini, tekanan uap dapat diatur melalui *reheater* dan *superheater*.

2. Aliran Uap (*Steam Flow*)

Pada *boiler* yang menjadi aliran uap adalah banyaknya uap yang harus dihasilkan *boiler* pada tingkat pengoperasian tertentu, jika melebihi tingkat ini bisa merusak peralatan ataupun meningkatkan biaya perawatan. Menurut keadaannya uap ada tiga jenis, yaitu:

- a. Uap jenuh (*saturated vapor*) merupakan uap yang tidak mengandung air dimana kondisi uap tepat di temperatur didihnya dan pada tekanan tertentu.
- b. Uap kering merupakan uap yang didapat dengan pemanas lanjut dari uap jenuh, pada tekanan tertentu dan suhu yang berbeda.
- c. Uap basah merupakan campuran dari uap jenuh yang masih mengandung air dan memiliki temperatur yang sama.

3. Temperatur

Dalam proses konversi wujud dari cair menjadi uap, air perlu dipanaskan dalam *furnace*. Panas yang dihasilkan dari proses pembakaran dalam *furnace* tersebut harus diperhatikan agar suhu uap yang dihasilkan memenuhi standar yang ditentukan, karena jika suhu uap kurang maka efisiensi akan turun tapi jika terlalu tinggi akan berpengaruh pada gas buangnya. Temperatur adalah panas kerja dalam *boiler*. Temperatur ini berbanding lurus dengan tekanan yang dihasilkan. Temperatur dan tekanan ini juga yang mencerminkan uap yang dihasilkan.

4. Kapasitas

Kapasitas adalah kemampuan *boiler* untuk menghasilkan uap dalam satuan berat per waktu. Untuk mendapatkan kapasitas *boiler*, harus mengetahui efisiensi dari *boiler* dan jumlah bahan bakar yang digunakan.

5. Efisiensi *Boiler*

Untuk melihat apakah desain suatu *boiler* telah tepat ditentukan oleh beberapa faktor yang mempengaruhi, diantaranya rasio udara terhadap jumlah bahan bakar yang berakibat pada tingkat pembakaran berlangsung secara sempurna atau tidak sempurna. Selanjutnya yang menentukan juga adalah jenis dan kualitas bahan bakar yang akan dibakar seperti padat, cair, atau gas. Banyak uap harus dihasilkan tiap jamnya, ratusan atau bahkan jutaan pon tiap jamnya juga perlu dipertimbangkan dalam desain.

6. Pengolahan Air Umpan *Boiler*

Memproduksi *steam* yang berkualitas tergantung pada pengolahan air yang benar untuk mengendalikan kemurnian *steam*, endapan dan korosi. Kinerja *boiler*, efisiensi, dan lamanya waktu penggunaan merupakan hasil langsung dari pemilihan dan pengendalian air umpan yang digunakan dalam *boiler*. Jika air umpan masuk ke *boiler*, kenaikan suhu dan tekanan menyebabkan komponen air memiliki sifat yang berbeda. Hampir semua komponen dalam air umpan dalam keadaan terlarut. Air boiler harus cukup bebas dari pembentukan endapan padat supaya terjadi perpindahan panas yang cepat dan efisien dan harus tidak korosif terhadap logam *boiler*. Air yang disuplai ke *boiler* untuk dirubah menjadi uap disebut air umpan.

Sumber air umpan terdiri dari dua, yaitu kondensat atau uap yang mengembun yang kembali dari proses, air *make up* (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpakan dari luar ruang *boiler* dan *plant* proses. Untuk mendapatkan efisiensi *boiler* yang lebih tinggi, digunakan ekonomiser untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang. (Boiler & Pemanas Fluida Termis, 2009)

Ketahanan *boiler* tergantung pada mutu air umpan dan air ketel agar tidak terjadi pengapuran (*scaling*) dan korosi air umpan dan air ketel harus memenuhi persyaratan seperti pada tabel 5.

Tabel 2. Syarat Air Umpan dan Air Ketel pada Boiler

Parameter	Satuan	Pengendalian Batas
pH	Unit	10.5 – 11.5
Conductivity	µmhos/cm	5000, max
TDS	Ppm	3500, max
P – Alkalinity	Ppm	-
M – Alkalinity	Ppm	800, max
O – Alkalinity	Ppm	2.5 x SiO ₂ , min
T. Hardness	Ppm	-
Silica	Ppm	150, max
Besi	Ppm	2, max
Phosphat residual	Ppm	20 – 50
Sulfite residual	Ppm	20 – 50
pH condensate	Unit	8.0 – 9.0

NALCOH. Reference

2.5.3 Evaluasi Kinerja Boiler

Parameter kinerja *boiler*, seperti efisiensi dan rasio penguapan, berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Bahkan untuk *boiler* yang baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mengakibatkan buruknya kinerja *boiler*.

1. Proses pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi cepat bahan bakar dengan oksigen disertai dengan produksi panas atau kalor. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksidasi yang cukup. Oksidasi yang dipakai berasal dari udara yang terdiri dari: 79% N₂ + 21% O₂. (Praswati, 2008)

Parameter yang diperlukan untuk kuantifikasi bahan bakar dan udara di dalam sebuah proses pembakaran adalah rasio udara/bahan bakar yaitu rasio jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar = mol udara/ mol bahan bakar atau massa udara/ massa bahan bakar.

$$\frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} = \frac{\text{mol udara} \times M_{\text{udara}}}{\text{mol bahan bakar} \times M_{\text{bahan bakar}}} \\ = \frac{\text{mol udara}}{\text{mol bahan bakar}} \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \right) \dots\dots\dots (12)$$

2. Kehilangan Energi pada Boiler

Kehilangan energi dapat dibagi kedalam kehilangan yang tidak atau dapat dihindarkan. Tujuan pengkajian energi harus mengurangi kehilangan yang dapat dihindari dengan meningkatkan efisiensi energi. Perbandingan udara bahan bakar teoritis atau stoikiometri menunjukkan kebutuhan udara minimum untuk pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Perbandingan ini dapat dinyatakan dalam bentuk massa udara/massa bahan bakar, mol udara/mol bahan bakar, ataupun dalam bentuk volume udara/volume bahan bakar. Perbandingan udara bahan bakar teoritis atau stoikiometri dapat ditentukan dengan analisis ultimasi begitu terbakar. Perbandingan ini dihitung dengan membuat kesetimbangan massa oksigen pada reaktan dapat terbakar (karbon, hidrogen, dan sulfur). Perbandingan udara bahan bakar teoritis ditulis dengan persamaan:

$$\frac{A}{F} = \frac{\text{massa O}_2 \text{ yang dibutuhkan dari udara per kg bahan bakar}}{0,232} \dots\dots (13)$$

Dimana :

F = Jumlah bahan bakar (kg)

A = Udara pembakaran (kg)

Faktor 0,232 merupakan fraksi massa oksigen dalam udara

2.5.4 Kehilangan Energi pada *Boiler*

Berdasarkan azas termodinamika, besarnya efisiensi *boiler* yang beroperasi pada tekanan uap dan suhu pembakaran tertentu, hanya dipengaruhi oleh suhu gas buang. Namun demikian, *boiler* sebagai bagian dari sebuah sistem penyedia uap tekan, selalu memiliki efisiensi total yang lebih rendah disbanding efisiensi diatas. Banyak variable proses memberikan kontribusi terhadap menurunnya efisiensi, dimulai dari proses pembakaran, proses *heat transfer*, proses aliran fluida dan penyebab lain yang sulit atau bahkan tak mungkin dihilangkan.

Disadari bahwa penurunan efisiensi sebesar 1% pada *boiler* yang berkapasitas ratusan mega-watt dan bekerja secara kontinyu, akan menyebabkan pemborosan biaya operasional yang sangat perlu untuk diselamatkan. Melalui pengamatan data dilapangan, dimungkinkan hingga 20% kerugian energi dapat diselamatkan melalui pengendalian jumlah udara persatuan bahan bakar serta penggunaan jenis bahan bakar dengan nilai kalor yang lebih baik. Terdapat setidaknya 7 poin penting perlu dilakukan pada saat pengoperasian sistem *boiler*.

1. Rasio Udara – Bahan Bakar

Perbandingan udara bahan bakar merupakan parameter terpenting yang berpengaruh terhadap efisiensi *boiler*. Prosentase perbandingan udara dinyatakan sebagai $AF/AF_{teoritik} \times 100$. Prosentase perbandingan udara pembakaran yang berlebihan merupakan penyebab utama menurunnya efisiensi *boiler* dikarenakan terlalu banyaknya energi yang dikonversikan oleh *boiler* melalui gas bekas. Kelebihan udara teoritik hingga 200% berpengaruh menurunnya efisiensi *boiler* antara 3 – 8 % tergantung pada suhu gas bekas. Penurunan efisiensi *boiler* oleh kenaikan suhu gas bekas pada prosentase udara teoritik tertentu ditimbulkan oleh kandungan energi sensibel pada gas bekas. Penurunan efisiensi akan lebih terasa pada prosentase udara rendah dibanding prosentase udara berlebih.

Pembakaran yang tidak sempurna membatasi energi bahan bakar yang tersedia merupakan kontribusi utama terhadap penurunan efisiensi yang besar. Penurunan ini tidak begitu banyak dipengaruhi oleh suhu gas bekas dikarenakan energi yang hilang pada pembakaran yang tidak sempurna akan lebih dominan disbanding energi sensibel yang hilang pada gas bekas. Untuk angka

perbandingan antara udara dan bahan bakar aktual untuk suatu proses pembakaran umumnya ditaksir dari pengukuran eksperimental komponen-komponen gas di dalam gas buang. Gas buang dapat dianalisis dengan menggunakan peralatan orsat. Untuk menentukan perbandingan antara udara dan bahan bakar aktual pada waktu membakar suatu bahan bakar maka analisis ultimasi dan analisis orsat sangat diperlukan. Setelah analisis gas buang dengan menggunakan gas *analyser* dan analisis ultimasi diketahui, maka perbandingan antara udara dan bahan bakar aktual dapat dihitung melalui persamaan:

Harga C_b dapat dihitung melalui persamaan:

$$C_b = C - C_r \dots\dots\dots (14)$$

Dimana:

C = Fraksi massa karbon dari analisis ultimasi begitu terbakar.

C_r = Fraksi massa bahan bakar karbon yang tak terbakar di dalam sisa.

Secara teoritis, oksigen dan karbon monoksida tidak dapat muncul secara serempak dalam gas buang tetapi biasanya keduanya muncul dalam proses pembakaran aktual disebabkan oleh pencampuran tak sempurna. Apabila angka perbandingan antara udara dan bahan bakar aktual diketahui, maka persentase kelebihan udara dapat dihitung. Persentase kelebihan udara ditentukan melalui persamaan:

$$\text{Persentase kelebihan udara} = \frac{(p)-(d)}{(0,01)-(d)} \dots\dots\dots (15)$$

Dimana:

P = Angka perbandingan udara bahan bakar aktual

D = Angka perbandingan udara bahan bakar teoritis

2. Suhu Gas Buang

Penurunan kinerja *boiler* dapat terjadi apabila suhu gas bekas keluar *boiler* meningkat. Oleh karena itu diagnose melalui pengukuran terhadap kemungkinan kenaikan suhu gas buang merupakan hal penting. Pengukuran tersebut harus dicatat setiap hari bersamaan dengan pencatatan kondisi beban uap dan kondisi udara sekitar. Lokasi detektor terletak sedekat mungkin dengan tirik akhir proses penukaran kalor. Dengan kata lain, apabila *boiler* dilengkapi

dengan *feedwater* ekonomiser, maka sensor terletak pada sisi keluar ekonomiser. Dibandingkan dengan pengaruh rasio udara-bahan bakar terhadap pengendalian efisiensi *boiler*, suhu cerobong menduduki posisi kedua. Sesuai dengan azas termodinamika II, suhu gas buang harus serendah mungkin untuk mendapatkan efisiensi *boiler* yang optimal. Sesuai mendasar, terdapat dua penyebab tingginya suhu cerobong, yaitu tidak cukupnya luasan permukaan dan teradapatnya endapan kerak pada permukaan *heat transfer*.

3. Tekanan kerja boiler

Boiler selalu bekerja pada tekanan yang lebih tinggi dari tekanan yang diperlukan. Dengan menurunkan tekanan boiler secara perlahan lahan sampai titik dimana jumlah uap yang dihasilkan tetap mampu memenuhi kebutuhan proses, mampu memperoleh peningkatan efisiensi meskipun besarnya peningkatan efisiensi tersebut sangat tergantung besarnya nilai penurunan tekanan uap yang terjadi. Sepertinya tidak terlalu dapat diyakini bahwa penurunan tekanan kerja boiler akan menghasilkan penghematan bahan bakar. Dari pengalaman menunjukkan bahwa hanya penghematan sekitar ½ % bahan bakar setiap penurunan tekanan 35 psig. Tetapi hal ini dapat dipahami bahwa dengan tekanan kerja yang rendah.

- a. Menurunkan suhu gas bekas dikarenakan meningkatnya proses heat transfer.
- b. Meurunkan kerugian kalor dari boiler dan perpipaan.
- c. Menurunkan tingkat kebocoran uap karena tekanan lebih rendah.

4. Suhu bahan bakar

Bahan bakar dengan nilai viskositas tertentu akan mengalami atomisasi dengan kualitas terbaik hanya pada tekanan yang tepat. Viskositas yang terlalu tinggi atau terlalu rendah akan cenderung mengalami atomisasi yang buruk dan berakibat menyebabkan efisiensi pembakaran yang rendah. Pada umumnya bahan bakar perlu dipanaskan terlebih dahulu menggunakan *preheater* hingga viskositas berada pada rentang antara 100 hingga 300 SUS. Suhu kerja *preheater* tergantung pada *grade* atau karakter bahan bakar yang digunakan.

Terbentuknya atomisasi yang baik juga ditentukan oleh proses pencampuran bahan bakar dan udara. Apabila campuran udara bahan bakar terlalu pekat atau

terlalu encer, pencampuran yang terjadi pada nozzle tidak rata dan menyebabkan menurunnya efisiensi. Suhu *preheater* dapat dibaca dengan dialtermometer, sedangkan viskositas dapat diukur dengan menggunakan *potable viscometer*. Sebagai contoh untuk mendapatkan viskositas antara 100-300 SUS memerlukan pemanasan bahan bakar antara 100 sampai 110°C untuk *grade* no 6 dan 7 sampai 80°C untuk *grade* no 4. Dengan menaikkan suhu bahan bakar untuk mendapatkan atomisasi yang sempurna, dapat diperoleh penghematan hingga 5%.

5. Atomisasi Bahan Bakar

Atomisasi bahan bakar merupakan fungsi tekanan bahan bakar, kekentalan bahan bakar, udara primer dan disain nosel. Mengoperasikan *burner* pada tekanan yang lebih tinggi atau lebih rendah akan menurunkan efisiensi pembakaran. Dengan mengatur tekanan bahan bakar sesuai dengan instruksi operasi nosel dari pabrik, akan mampu meningkatkan efisiensi sekitar 1%.

6. Pengendalian Boiler Tunggal

Boiler bisa saja bekerja kondisi ON untuk beberapa menit dan kemudian OFF untuk beberapa menit. Hal ini akan menyebabkan kehilangan energi yang cukup besar dikarenakan terbuangnya kalor dari *boiler* pada saat OFF atau *boiler* bisa saja dalam kondisi HUNT yaitu laju pengapian secara kontinyu diatur dan menghasilkan kelebihan udara yang cukup besar. Kehilangan energi pada keadaan ini bisa diatasi dengan cara mengatur kelajuan pembakaran pada daerah menengah.

7. Proses *Blowdown*

Air harus secara kontinyu ditambahkan ke dalam *boiler* untuk menggantikan uap yang diproduksi. Padatan yang terkandung di dalam *make up water* semakin menambah konsentrasi sebanding dengan jumlah uap yang diproduksi. Air di dalam *boiler* harus di *blowdown* untuk mencegah terjadinya penyumbatan pada *boiler*. Frekuensi *blowdown* tergantung dari jumlah padatan dan kebiasaan. Terdapat 2 tipe *blowdown* yaitu:

- a. *Mud-blowdown*, yaitu untuk membuang lumpur berat yang mengendap pada dasar *boiler*, dilakukan beberapa detik dengan interval waktu tertentu.

- b. *Continuous* blowdown atau *kimming blowdown*, untuk mengeluarkan padatan yang terkandung dalam air.

2.5.5 Kajian Efisiensi Boiler

Efisiensi termis boiler didefinisikan sebagai “persen energi (panas) masuk yang digunakan secara efektif pada steam yang dihasilkan”. Terdapat dua metode pengkajian efisiensi boiler.

1. Metode langsung, energi yang didapat dari fluida kerja (air dan steam) dibandingkan dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar boiler.
2. Metode tidak langsung, efisiensi merupakan perbedaan antara kehilangan dan energi yang masuk.

Efisiensi ini dapat dievaluasi dengan menggunakan rumus:

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{panas yang diinginkan}}{\text{panas masuk}} \times 100 \dots\dots(10)$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{GCV}} \times 100 \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{Efisiensi Furnace } (\eta) = \frac{q \text{ konveksi}}{q \text{ bahan bakar}} \times 100 \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{Efisiensi Termal Boiler } (\eta) = \frac{\text{kualitas steam}}{q \text{ bahan bakar}} \times 100 \dots\dots\dots(13)$$

Sumber: *Boiler & Pemanas Fluida Termis*, 2009

Parameter yang dipantau untuk perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung adalah:

Q : jumlah steam yang dihasilkan per jam dalam kg/jam.

q : jumlah bahan bakar yang digunakan per jam dalam kg/jam.

jenis bahan bakar dan nilai panas kator bahan bakar (GCV) dalam kkal/kg bahan bakar.

Dimana:

hg = entalpi steam jenuh dalam kkal/kg steam

hf = entalpi air umpan dalam kkal/kg air