

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip 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.

2.1.1 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

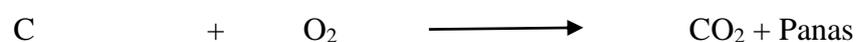
salah satu elemen ditiadakan maka proses pembakaran yang ditandai dengan adanya nyala api dapat terhenti. Konsep inilah yang kemudian dijadikan dasar dalam mengontrol nyala api dari pembakaran. Tetapi, pada dasarnya keberadaan tiga elemen itu saja belum cukup untuk memenuhi syarat terjadinya nyala api pembakaran.

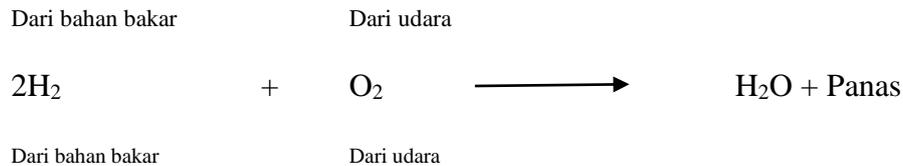
Nyala api yang terbentuk dari proses pembakaran merupakan fenomena yang terjadi dalam fasa gas, karena proses pembakaran baru terjadi apabila campuran udara dan bahan bakar sudah berada pada fase yang sama (fase gas). Sehingga pembakaran yang menghasilkan nyala api dengan bahan bakar cair dan padat harus 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, 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*.

2.1.2 Reaksi Pembakaran

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





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

2.1.3 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 CO_2 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 :

$$\text{Rasio Udara} = \frac{(\text{Jumlah Udara Pembakaran actual})}{(\text{Jumlah Udara pembakaran teoritis})} = \frac{(21)}{(21 - \% \text{O}_2)}$$

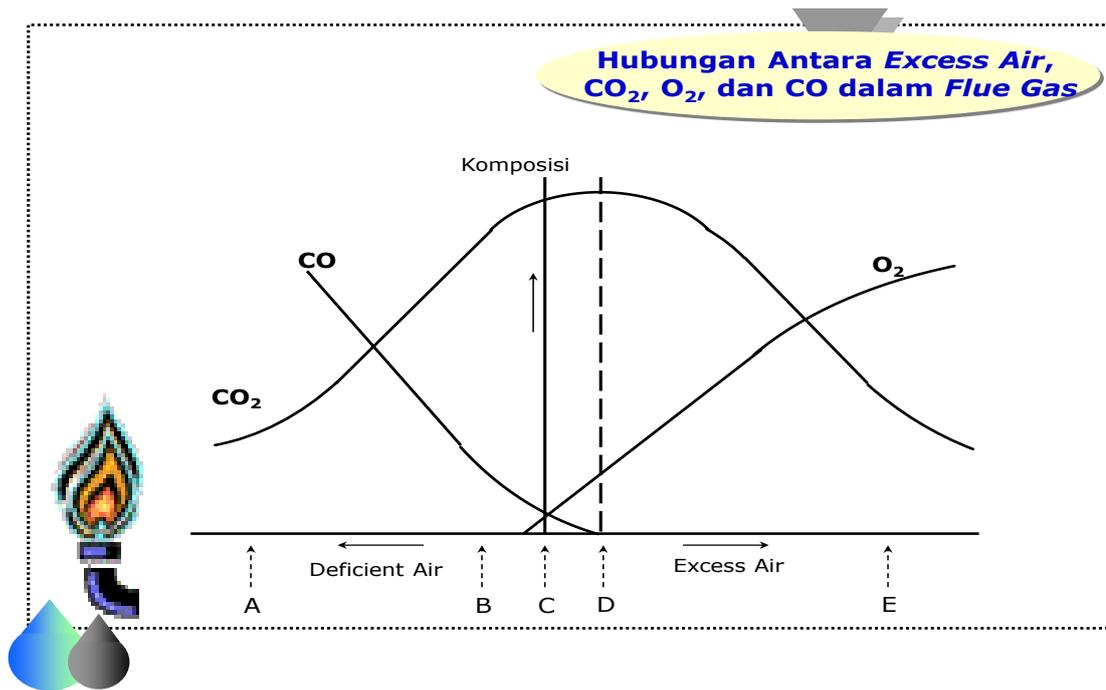
$$\% \text{ Excess air} = \frac{\% \text{O}_2}{21 - \% \text{O}_2} \times 100 \%$$

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

2.1.4 Profil Pembakaran

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



Gambar 1. 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 CO₂, tetapi lebih banyak CO yang dihasilkan.
2. Dengan menambah udara (titik B), sebagian CO diubah menjadi CO₂ dengan melepas lebih banyak panas. Komposisi CO dalam gas buang turun tajam dan CO₂ meningkat.
3. Pada titik dimana udara stoikiometrik terpenuhi (titik C), semua karbon dapat seluruhnya diubah menjadi CO₂ pada system ideal. Kondisi ini tidak pernah dapat dicapai.

4. Operasi pembakaran normal (titik D) pada prakteknya dapat dicapai dengan menambah sedikit udara di atas kebutuhan stoikiometrinya (*excess air*) untuk mencapai pembakaran lengkap. Pada kondisi ini, CO₂ pada level maksimumnya, dan produksi CO pada level minimumnya dalam gas buang. Pembakaran paling efisien.
5. Semakin banyak udara ditambahkan (titik E), level CO₂ kembali turun karena bercampur dengan udara lebih. Udara lebih yang tinggi juga merugikan karena menurunkan temperature pembakaran dan menyerao panas berguna dalam gas buang.

2.1.5 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.

2.2 Sifat – sifat Udara

Dalam keadaan udara kering komposisi unsur – unsur gas yang terdapat pada atmosfer terdiri atas unsur nitrogen (N₂) 78%, oksigen (O₂) 21%, karbondioksida

(CO₂) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O₃), hidrogen (H₂), 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.

2.2.1 Kelembaban Udara (*Humidity*)

Kelembaban Udara (*humidity gauge*) 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. Alat yang digunakan untuk mengukur kelembaban disebut dengan Higrometer. Sebuah humidistat digunakan untuk mengatur tingkat kelembaban udara dalam sebuah bangunan dengan pengawal lembab (*dehumidifier*). 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°C (86°F) dan tidak melebihi 0,5% pada 0°C (32°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.

2.2.2 Jenis – jenis Kelembaban 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/m³). 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.

1. Kelembaban Mutlak/ Absolut

Kelembaban absolut mendefinisikan massa dari uap air pada volume tertentu campuran atau gas dan umumnya dalam satuan gram per meter kubik (g/m^3) aatau dengan banyaknya uap air dalam setiap unit volume udara.

2. Kelembaban Nisbi (RH)

Kelembaban relatif/nisbi yaitu perbandingan jumlah uap air di udara dengan yang terkandung di udara pada suhu yang sama. Kelembaban nisbi membandingkan antara kandungan/ tekanan uap air aktual dengan keadaan jenuhnya atau kapasitas udara untuk menampung uap air.

Kelembaban nisbi l(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:

$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P^*_{H_2O}} \times 100 \%$$

Dimana:

- RH adalah kelembaban relatif campuran,
 - $P_{(H_2O)}$ adalah tekanan parsial uap air dalam campuran,
 - $P^*_{(H_2O)}$ 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 Bahan Bakar

2.3.1 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:

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- g. 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 atau	-	51	-	D 613 – 95
	- Indeks Cetana	-	48	-	D 4737 - 96a
2	Berat Jenis (pada suhu 15 ⁰ C)	Kg/m ³	82 0	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	⁰ C	-	340	

T 95	°C	-	360
Titik Didih Akhir	°C	-	370

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

2.3.2 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 penguapan 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*:

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

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 penguapan 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:

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

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).

2.4 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 :

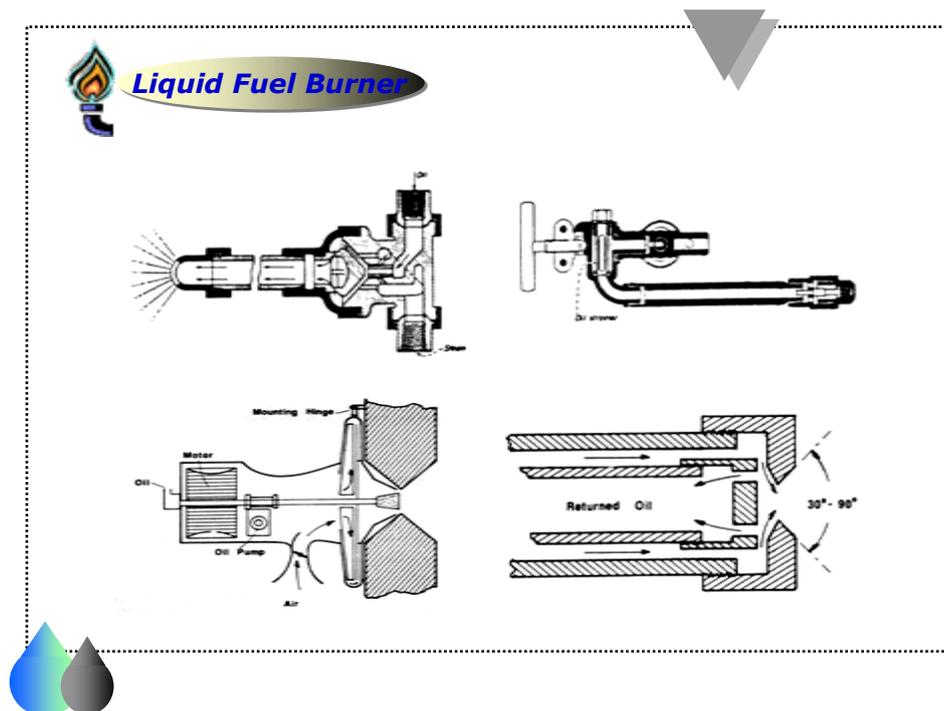
1. Nyala api yang stabil
2. Pembakaran yang lengkap
3. Pengontrolan yang baik

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

1. *Liquid Fuel Burner*

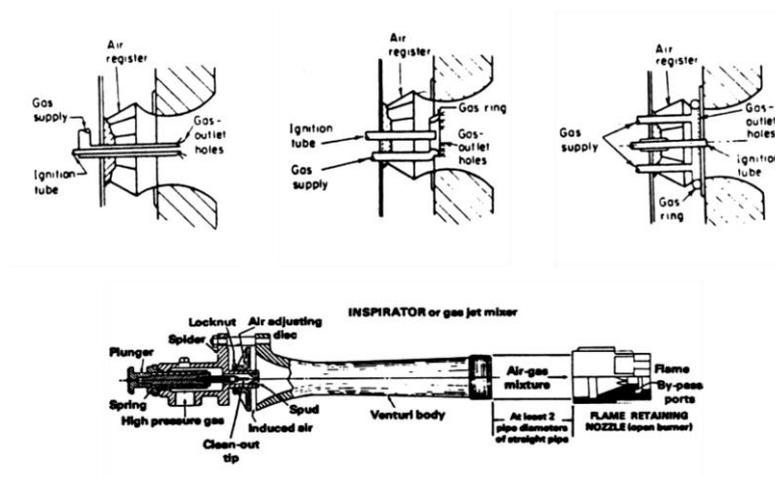
Burner dengan bahan bakar cair mempunyai permasalahan khusus yaitu proses *mixing* antara bahan bakar cair dan udara. Untuk memperbaiki pencampuran bahan bakar udara, proses pengkabutan harus menjamin terjadi atomisasi yang bagus dari bahan bakar sehingga udara dapat berdifusi dengan mudah masuk ke bahan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



Gambar 2. *Liquid Fuel Burner*

2. Gas Burner

Proses pembakaran bahan bakar gas tidak memerlukan proses pengkabutan atau atomisasi, bahan bakar langsung berdifusi dengan udara. Bahan bakar gas dan udara tidak bercampur dulu sebelum terjadi proses pembakaran. Bahan bakar gas bertekanan dilewatkan melalui nosel, udara akan berdifusi secara alami dengan bahan bakar. Proses pembakaran dengan *burner* tipe ini dinamakan pembakaran difusi.



Gambar 3. Gas Burner

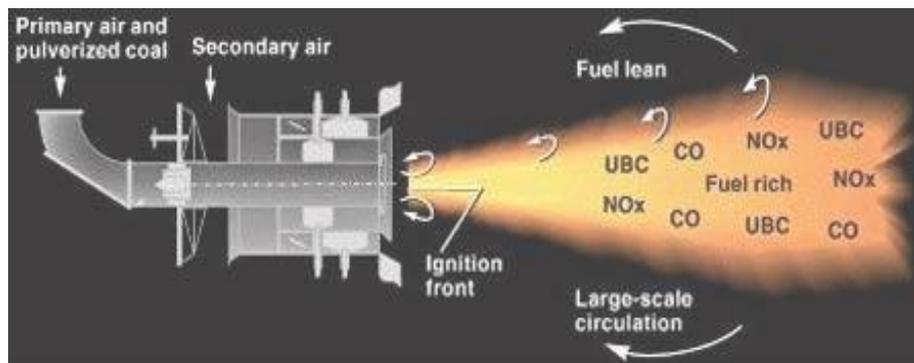
3. Burner untuk bahan padat

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

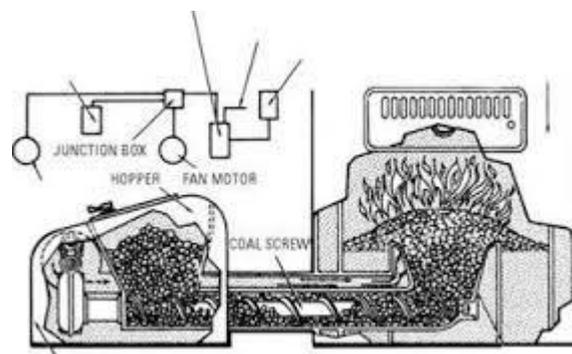
Bahan bakar padat akan dihancurkan lebih dahulu dengan alat *pulverized* sampai ukuran tertentu sebelum dicampur dengan udara. Selanjutnya campuran serbuk batu bara dan udara diberi tekanan kemudian disemprotkan menggunakan *diffuser*. Proses pembakaran dibantu dengan penyalaan dengan bahan bakar gas 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

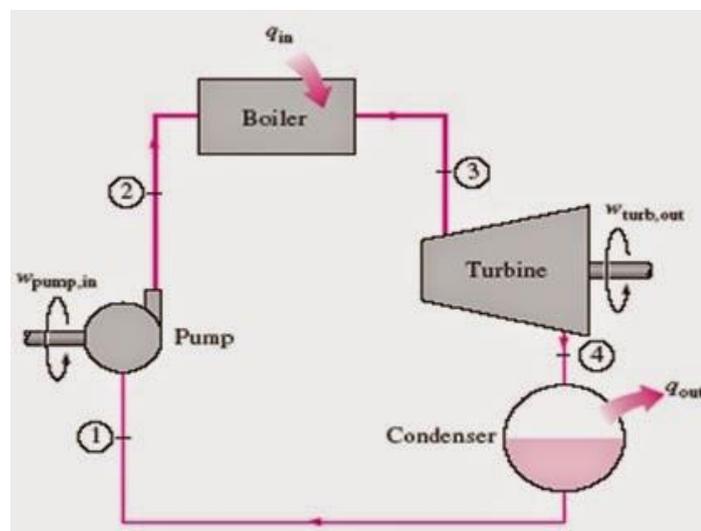
Stoker jenis ini banyak dipakai untuk industri skala kecil, konstruksinya sederhana. Bahan bakar di dalam berupa batu bara dimasukkan ke perapian dengan *screw* pengumpan. Proses pembakaran terjadi di dalam *retort*, batu bara akan dipanaskan untuk menguapkan air dan zat terbang kemudian arang terbakar. Sisa pembakaran berupa abu akan digeser ke luar karena desakan batu bara baru yang belum terbakar. Udara tambahn digunakan untuk membantu proses pembakaran sehingga lebih efisien.



Gambar 5. Underfeed stoke

2.5 Boiler

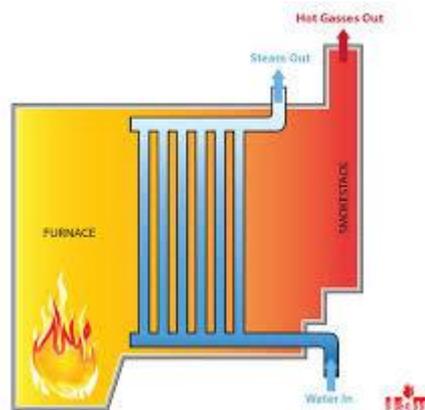
Pembangkit listrik tenaga uap merupakan salah satu dari jenis pembangkit, dimana pembangkit ini memanfaatkan uap yang dihasilkan oleh *boiler* sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin dan sekaligus memutar generator sehingga akan dihasilkan tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga uap yang sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu *boiler*, turbin uap, kondensator dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap dapat ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6. Skema Sederhana PLTU

2.5.1 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 diuapkan (Raharjo dan Karnowo 2008). Boiler pipa air dapat dilihat pada Gambar 10.



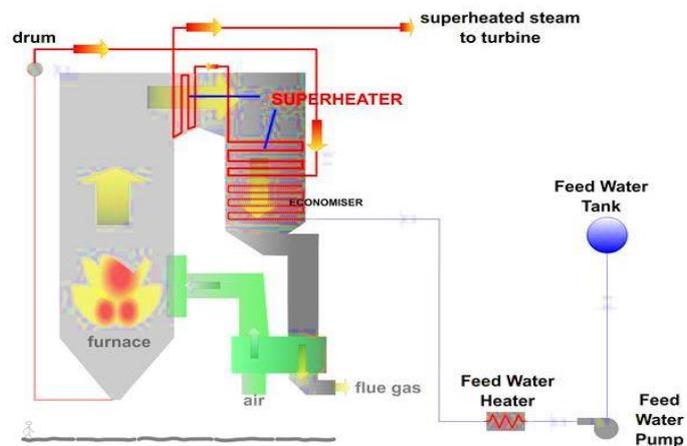
Gambar 7. Water Tube Boiler

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).

2.6 SuperHeater

Superheater adalah piranti penting pada unit pembangkit uap. Tujuannya adalah untuk meningkatkan temperatur uap jenuh tanpa menaikkan tekanannya. Biasanya piranti ini merupakan bagian integral dari ketel, dan ditempatkan dijalur gas asap panas dari dapur. Gas asap ini digunakan untuk memberikan panas lanjut pada uap.

Superheater memproduksi *superheated steam* atau uap kering. Uap air ini menyimpan lebih banyak energi panas daripada uap air *saturated* (uap air basah), ditandai dengan nilai entalpi yang lebih tinggi. Uap air yang diproduksi oleh boiler konvensional umumnya hanya mencapai fase *saturated*, dan pada *superheater*, uap air *saturated* ini akan dipanaskan lebih lanjut mencapai fase *superheated*. Selain menyimpan energi panas yang lebih besar, uap air *superheater* juga menghilangkan sifat basah dari uap *saturated* sehingga tidak akan terjadi kondensasi yang terlalu cepat di dalam mesin yang menggunakan uap air.



Gambar 8. Diagram *superheater*

2.7 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin tenaga yang berfungsi untuk mengubah energi thermal (energi panas yang terkandung dalam uap) menjadi energi poros (putaran). Sebelum energi termal (*enthalpy*) diubah menjadi energi poros, energi tersebut diubah dulu menjadi energi kinetik. Secara umum, sebuah turbin uap secara prinsip terdiri dari dua komponen berikut (Yunus, 2010):

1. Nosel (*nozzle*), dimana energi panas dari uap tekanan tinggi diubah menjadi energi kinetik, sehingga uap keluar nosel dengan kecepatan sangat tinggi.
2. Sudu, yang merubah arah dari uap yang disemprotkan nosel, sehingga akan bekerja gaya pada sudu karena perubahan momentum dan memutar turbin.

2.7.1 Prinsip Kerja Turbin Uap

Suatu turbin dapat terdiri dari satu dua atau banyak silinder yang merupakan mesin rotasi berfungsi untuk merubah energi panas menjadi energi mekanik. Tiap silinder memiliki sebuah rotor yang disangga oleh bantalan-bantalan. Rotor-rotor tersebut disambung menjadi satu termasuk rotor generator. Ruang diantara rotor

dengan rumah turbin (*casing*) terdiri dari rangkaian sudu-sudu tetap dan sudu-sudu gerak yang dijajarkan berselang-seling.

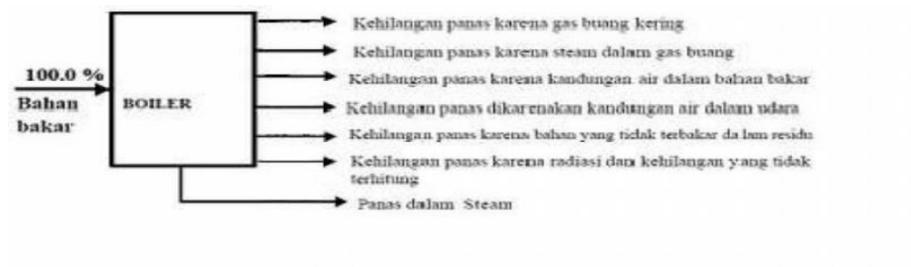
Sudu-sudu tetap dipasang disekeliling bagian dalam rumah turbin, sedang rangkaian sudu gerak dipasang pada rotor. Bila kedalam turbin dialirkan uap, maka energi panas yang dikandung uap akan diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Mula-mula energi panas dalam uap diubah terlebih dahulu menjadi energi kinetik (kecepatan) dengan cara melewatkan uap melalui nosel-nosel. Uap berkecepatan tinggi kemudian diarahkan ke sudu-sudu sehingga menghasilkan putaran poros turbin dimana energi mekanik ini selanjutnya dapat digunakan untuk menggerakkan generator, pompa dan sebagainya.

Perubahan energi panas menjadi energi kinetik terjadi didalam nosel (sudu diam) turbin, sedangkan perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor turbin terjadi pada sudu jalan turbin. Jadi didalam turbin, uap mengalami proses ekspansi yaitu penurunan tekanan dan mengalir secara kontinyu. Akibat pengurangan tekanan uap didalam rangkaian sudu-sudu, maka kecepatan uap meningkat sangat tinggi. Kecepatan aliran uap tersebut akan bergantung pada selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi. Selisih banyaknya panas uap sebelum dan sesudah ekspansi didalam turbin dinamakan penurunan panas/*heat drop* (Pusdiklat PLN, 2006).

2.8 Neraca Kalor

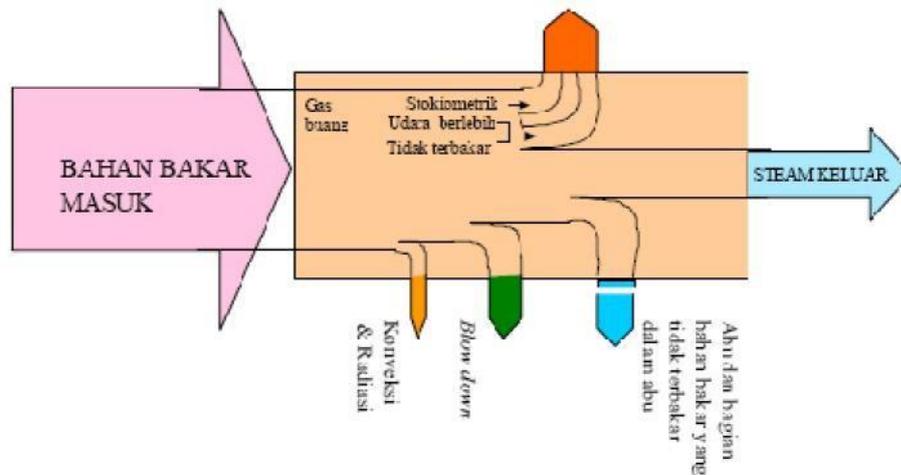
Parameter kinerja *boiler*, seperti efisiensi dan rasio penguapan, berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Bahkan untuk *boiler* yang baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mengakibatkan buruknya kinerja *boiler*. Neraca panas dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Uji efisiensi *boiler* dapat membantu dalam menemukan penyimpangan efisiensi *boiler* dari efisiensi terbaik dan target area permasalahan untuk tindakan

perbaikan. Proses pembakaran dalam *boiler* dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi (UNEP, 2006). Gambar 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. Panah tebal menunjukkan jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing.



Gambar 9. Sistem Neraca Massa dan Panas

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)



Gambar 9 merupakan diagram neraca energi yang menggambarkan keseimbangan energi total yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan boiler dalam bentuk yang berbeda. Gambar 9 memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan steam.

Gambar 9. Rugi-Rugi pada Boiler

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2006)

Kehilangan energi dapat dibagi kedalam kehilangan yang tidak dapat dihindarkan dan kehilangan yang dapat dihindarkan. Tujuan dari pengkajian energi adalah agar rugi-rugi/kehilangan dapat dihindari, sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi. Rugi-rugi yang dapat diminimalisasi antara lain (UNEP, 2006):

- a. Kehilangan gas cerobong :
 - Udara berlebih (diturunkan hingga ke nilai minimum yang tergantung dari teknologi *burner*, operasi (kontrol), dan pemeliharaan).
 - Suhu gas cerobong (diturunkan dengan mengoptimalkan perawatan (pembersihan), beban; *burner* yang lebih baik dan teknologi boiler).
- b. Kehilangan karena bahan bakar yang tidak terbakar dalam cerobong dan abu (mengoptimalkan operasi dan pemeliharaan; teknologi *burner* yang lebih baik).
- c. Kehilangan dari *blowdown* (pengolahan air umpan segar, daur ulang kondensat).
- d. Kehilangan kondensat (manfaatkan sebanyak mungkin kondensat).
- e. Kehilangan konveksi dan radiasi (dikurangi dengan isolasi boiler yang lebih baik).

2.9 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 oksiden yang cukup. Oksiden 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.

$$\frac{\text{massa udara}}{\text{massa bahan bakar}} = \frac{\text{mol udara} \times M_{\text{udara}}}{\text{mol bahan bakar} \times M_{\text{bahan bakar}}}$$

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

Sumber: Termodinamika Jilid 2 Michael J. Moran Halaman 330

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:

$$\frac{A}{F} = \frac{\text{massa } O_2 \text{ yang dibutuhkan dari udara per kg bahan bakar}}{0,232}$$

Dimana :

F = Jumlah bahan bakar (kg)

A = Udara pembakaran (kg)

