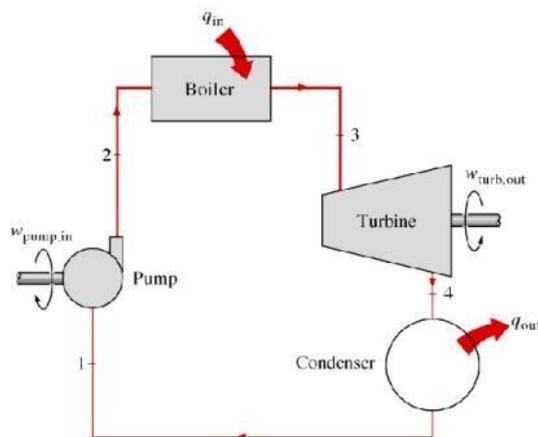


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

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 yang 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 kedalam air yang ada dalam *steamdrum*. Uap dari *steamdrum* dialirkan keturbin 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 1



Gambar 1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap
Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

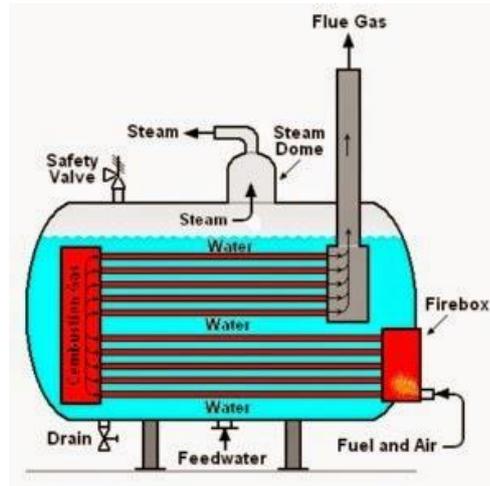
2.2. Boiler

Peralatan yang paling penting pada mesin tenaga uap berbentuk bejana tekan berisi fluida air yang dipanasi langsung oleh energi kalor dari proses pembakaran, atau dengan elemen listrik atau energi nuklir. Air pada *boiler* akan terus menyerap kalor sehingga temperaturnya naik sampai temperatur mendidih, sehingga terjadi penguapan. Untuk menghasilkan kapasitas uap yang besar, dibutuhkan jumlah kalor yang besar sehingga sirkulasi air harus bagus sehingga tidak terjadi *overheating* pada pipa-pipa airnya. Urutan energi yang dirubah menjadi energi kinetis dan selanjutnya dirubah lagi menjadi energi mekanis dan yang di hasilkan adalah energi listrik.

Mesin tenaga uap merupakan jenis mesin pembakaran luar dimana fluida kerja dengan sumber energi terpisah. Sumber energi kalor dari proses pembakaran digunakan untuk membangkitkan uap panas. Uap panas dibangkitkan di dalam *boiler* atau sering disebut ketel uap. Untuk memperoleh uap dengan temperatur yang tinggi digunakan *reheater*. *Reheater* uap dipanaskan lagi menjadi uap panas lanjut sehingga temperaturnya naik. Selanjutnya uap panas dimasukkan ke turbin uap, di dalam turbin uap energi uap panas dikonversi menjadi energi mekanik di dalam sudu-sudu turbin uap. Energi mekanik yang berupa putaran poros turbin uap akan menggerakkan generator pada instalasi pembangkit listrik tenaga uap. Ada dua tipe dari *boiler* yang sudah biasa dipakai yaitu:

- a. *Fire Tube Boiler* atau *Boiler* pipa api

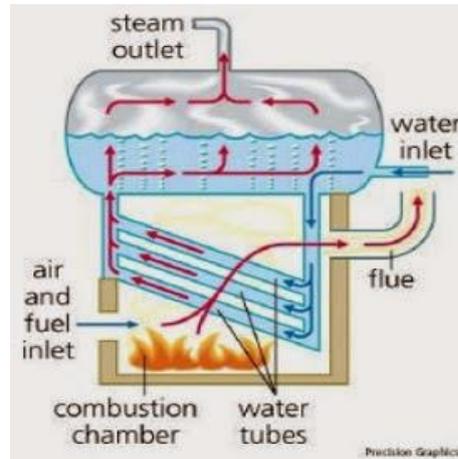
Boiler jenis ini pada bagian *tubnya* dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu *shell* dialiri air yang akan diuapkan. *Tube-tubnya* langsung didinginkan oleh air yang melingkupinya, jumlah *pass* dari *boiler* bergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas pembakaran diantara *furnace* dihitung sebagai *pass* pertama. *Boiler* jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah.



Gambar 2 Fire tube boiler

b. *Water Tube Boiler* atau *Boiler* pipa air

Boiler jenis ini banyak dipakai untuk kebutuhan uap skala besar. Prinsip kerja dari *boiler* air berkebalikan dengan pipa api, gas pembakaran dari *furnace* dilewatkan ke pipa-pipa yang berisi air yang akan diuapkan. Ada dua keuntungan menggunakan *boiler* pipa air dari pada pipa api yaitu kapasitas yang besar dicapai dengan memperbanyak jumlah *tube* atau pipa tanpa bergantung ukuran dari *shell* dan drum kemudian keuntungan kedua adalah *shell* dan drum uap tidak terkena radiasi langsung dari kalor pembakaran sehingga dimungkinkan dibuat *boiler* dengan kapasitas dan tekanan uap yang besar. Berbagai jenis bahan bakar dapat dipakai pada *boiler* tipe ini, variasi ukuran juga tidak menimbulkan masalah.



Gambar 3 Water Tube Boiler

2.2.1 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:

- Uap jenuh (*saturated vapor*) merupakan uap yang tidak mengandung air dimana kondisi uap tepat di temperatur didihnya dan pada tekanan tertentu.
- Uap kering merupakan uap yang didapat dengan pemanas lanjut dari uap jenuh, pada tekanan tertentu dan suhu yang berbeda.
- 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 kondesat 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 1.

Tabel 1 Syarat Air Umpan dan Air Ketel pada Boiler

Parameter	Satuan	Pengendalian Batas
pH	Unit	10.5 – 11.5
Conductivity	$\mu\text{mhos/cm}$	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

2.3 Turbin Uap

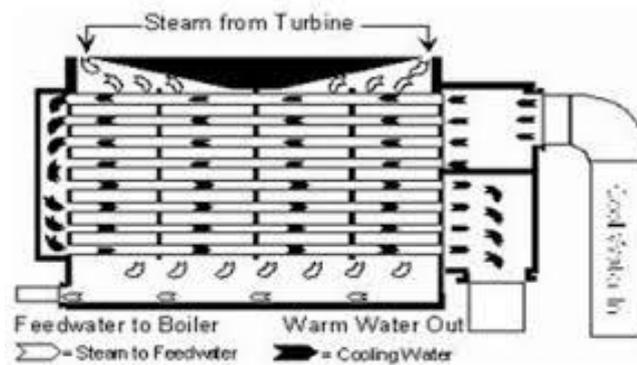
Peralatan yang paling utama dalam sistem tenaga uap adalah turbin uap. Turbin uap berfungsi sebagai tempat untuk mengkonversikan energi yang terkandung dari uap panas dari *boiler* menjadi energi mekanik poros turbin. Secara umum tenaga uap dibagi menjadi dua yaitu turbin uap jenis implus dan jenis reaksi. Komponen turbin uap yang paling penting adalah sudu-sudu, karena di sudu-sudu inilah sebagian besar energi uap panas di transfer menjadi energi mekanik.



Gambar 4 Bentuk sudu-sudu turbin uap

2.4 Kondenser

Proses konversi energi dari satu energi menjadi energi lainnya untuk mesin-mesin panas selama transfer energi selalu ada transfer panas pada fluida kerja. Jika tidak semua energi panas dapat dikonversikan menjadi energi berguna atau dengan kata lain “harus ada yang dibuang ke lingkungan”. Pada sistem tenaga uap proses transfer panas ke lingkungan terjadi pada kondensor. Sudah jelas fungsi kondensor adalah alat penukar kalor untuk melepaskan panas sisa uap dari turbin. Uap sisi dari turbin uap masih dalam keadaan uap jenuh dengan energi yang sudah berkurang. Dalam kondensor semua energi dilepaskan ke fluida pendingin.



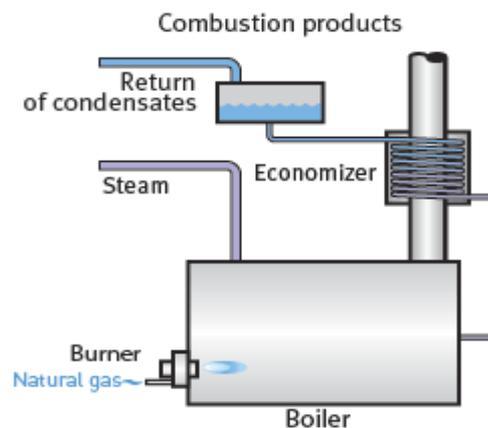
Gambar 5 Kondensor

2.5 Ekonomizer

Peralatan tambahan yang sangat penting pada mesin tenaga uap adalah ekonomiser. Ekonomiser adalah sejenis *heat exchanger* yang terdiri dari fluida air yang akan masuk *boiler*. Pemasangan ekonomiser pada laluan gas buang dan cerobong asap. Ekonomiser dirancang mempunyai banyak sirip dari material logam untuk memperluas permukaan singgung perpindahan kalor dari gas buang yang bertemperatur tinggi ke fluida air bertemperatur lebih rendah.

Karena hal tersebut fluida air pada ekonomiser akan mudah menyerap panas dari gas buang dari proses pembakaran. Temperatur air yang keluar dari ekonomiser lebih tinggi dari temperatur lingkungan sehingga setelah masuk *boiler* tidak dibutuhkan energi kalor yang besar. Energi kalor yang dibutuhkan hanya

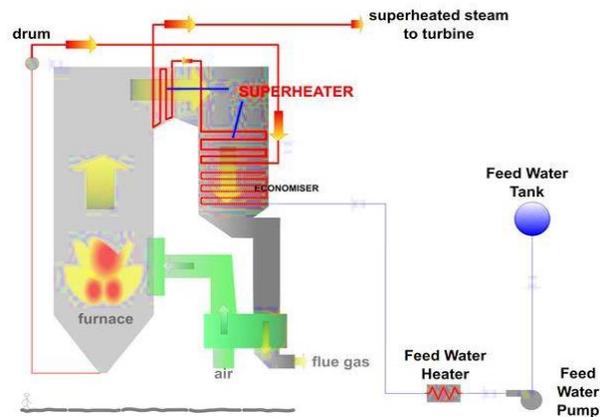
untuk menaikkan temperatur dari ekonomiser menjadi temperatur didih *boiler*. Jadi, dengan pemasangan ekonomiser akan menaikkan efisiensi sistem. Karena ekonomiser disinggungkan dengan gas buang yang banyak mengandung zat-zat polusi yang dapat menimbulkan korosi, maka pemilihan material dari ekonomiser bergantung dari jenis bahan bakar yang digunakan pada *stoker* atau *burner*.



Gambar 6 Economizer

2.6 Superheater

Kondisi uap dari *boiler* yang masuk instalasi perpipaan sebelum masuk turbin akan banyak mengalami perubahan terutama kehilangan kalor yang tidak sedikit dan kondensasi sehingga pada waktu masuk turbin energinya tidak maksimal. Untuk mengatasi hal tersebut uap dari boiler dipanaskan kembali sampai kondisi uap panas lanjut. Saluran pipa yang berisi uap jenuh setelah dari *boiler* dilewatkan ke gas pembakaran sehingga terjadi perpindahan kalor kembali ke uap. Karena ada kalor yang masuk, temperatur uap jenuh akan naik sampai kondisi uap panas lanjut. Sebagai contoh uap jenuh yang keluar dari *boiler* bertemperatur sekitar 200°C akan naik sampai 240°C dalam kondisi *superheated*. Dengan kondisi uap panas lanjut yang masuk turbin akan menaikkan efisiensi turbin.



Gambar 7 Diagram *Superheater*

2.7 Pembakaran

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.

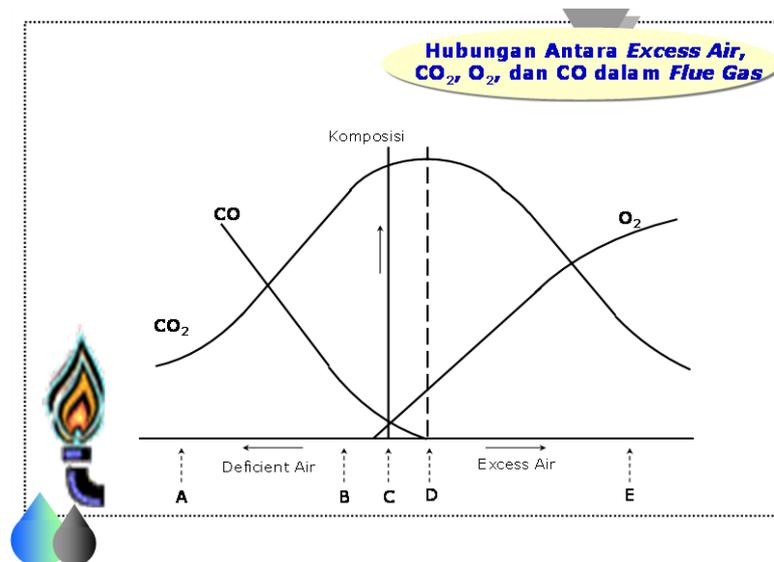
Nitrogen adalah gas lambat dan tidak berpartisipasi dalam pembakaran. Selama proses pembakaran, butiran minyak bahan bakar dipisahkan menjadi elemen komponennya yaitu hidrogen dan karbon yang masing-masing bergabung dengan oksigen dari udara secara terpisah. Hidrogen bergabung dengan oksigen untuk membentuk 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.

2.7.1 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.

2.7.2 Profil Pembakaran

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



Gambar 8 Profil Pembakaran Bahan Bakar

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

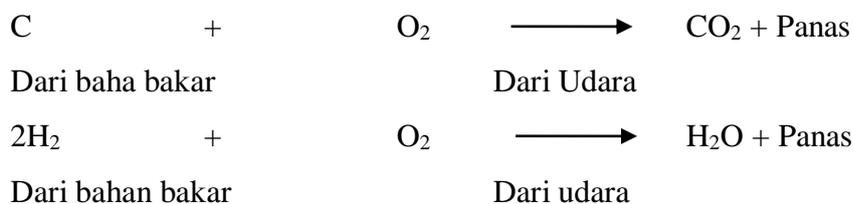
berikut:

- a. Pada laju udara dibawah kebutuhan teoritisnya (titik A), semua karbon dalam bahan bakar tidak semuanya diubah menjadi CO₂, tetapi lebih banyak CO yang dihasilkan.
- b. 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.
- c. Pada titik dimana udara stoikiometrik terpenuhi (titik C), semua karbon dapat seluruhnya diubah menjadi CO₂ pada system ideal. Kondisi ini tidak pernah dapat dicapai.
- d. 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, CO₂ pada level maksimumnya, dan produksi CO pada level minimumnya dalam gas buang. Pembakaran paling efisien.

Semakin banyak udara ditambahkan (titik E), level CO₂ kembali turun karena bercampur dengan udara lebih. Udara lebih yang tinggi juga merugikan karena menurunkan temperatur pembakaran dan menyerah panas berguna dalam gas buang.

2.7.3 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).

2.8 Proses Perpindahan Panas

Kalor adalah suatu energy yang mudah diterima dan mudah sekali dilepaskan sehingga dapat mengubah temperatur zat tersebut menjadi naik atau turun dan memiliki satuan °C atau Kelvin. Kalor juga bisa berpindah dari satu zat ke zat lain melalui medium atau perantara (Okta,2010).

Perpindahan panas adalah suatu proses perpindahan energy panas pada suatu zat atau ke zat yang lain. Proses perpindahan panas dari sumber panas ke penerima dibedakan atas tiga cara yaitu (McCabe, 1993):

1. Perpindahan panas secara konduksi
2. Perpindahan panas secara konveksi
3. Perpindahan panas secara radiasi

2.8.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana molekul-Molekul dari zat perantara tidak ikut berpindah tempat tetapi molekul-molekul tersebut hanya menghantarkan panas atau proses perpindahan panas dari suhu yang tinggi ke bagian lain yang suhunya lebih rendah. Konduksi termal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan electron yang terikat dan konduksi termal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul (McCabe, 1993). Terdapat hubungan matematik antara laju perpindahan kalor secara konduksi dengan gradient suhu normal, yang dikenal dengan Hukum Fourier, (JP.Holman, 1986):

$$Q_k = k.A \left(-\frac{dT}{dx} \right) \dots\dots\dots \text{pers 1}$$

Dimana :

q_{kond} = laju perpindahan kalor secara konduksi

dT/dx = gradient suhu kearah kalor perpindahan kalor

k = konduktivitas termal bahan

A = luas bidang aliran kalor, untuk silinder : $2\pi rL$

Maka :

$$q_{\text{kond}} = -k \cdot 2\pi r L \left(-\frac{dT}{dx} \right) \dots\dots\dots \text{pers 2}$$

2.8.2 Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara ikut bergerak mengalir dalam perambatan panas atau proses perpindahan panas dari satu titik ke titik lain dalam fluida antara campuran fluida dengan bagian lain.

Arus fluida yang melintas pada suatu permukaan, maka akan ikut terbawa sejumlah entalpi. Aliran entalpi ini disebut aliran konveksi kalor atau konveksi. Konveksi merupakan suatu fenomena makroskopik dan hanya berlangsung bila ada gaya yang bekerja pada partikel atau ada arus fluida yang dapat membuat gerakan melawan gaya gesek (McCabe, 1993). Kalor dipindah secara konveksi dinyatakan dengan persamaan Newton tentang pendinginan (Holman, 1986).

Dikutip dari JP. Holman (1986), didapat hubungan matematik antara laju perpindahan kalor secara konveksi dengan koefisien perpindahan panas konveksi (h):

$$q_{\text{konv}} = h_{\text{io}} \cdot A (T_f - T_v) \dots\dots\dots \text{pers 3}$$

Dimana :

q_{konv} = laju perpindahan kalor konveksi

h_{io} = koefisien perpindahan panas konveksi

T_f = temperatur film, dimana besar temperatur film adalah :1

$$T_f = \frac{T_v + T_w}{2}$$

T_v = temperatur fluida dalam *tube*

Menentukan koefisien perpindahan panas konveksi (h_{io}) :

$$h_{\text{io}} = jH \cdot \left[\frac{k}{De} \right] \cdot \left[\frac{c \cdot \mu}{k} \right]^{1/2} \cdot \phi \dots\dots\dots \text{pers 4}$$

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{ID}{OD} \dots\dots\dots \text{pers 5}$$

Ada dua macam perpindahan panas secara konveksi, yaitu :

a. Konveksi Bebas (*Natural Convection*)

Merupakan proses perpindahan panas yang berlangsung secara alamiah, dimana perpindahan panas dalam molekul – molekul dalam zat yang dipanaskan terjadi dengan sendirinya tanpa adanya tenaga dari luar. Konveksi bebas/alamiah dapat terjadi karena ada arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi dari luar sistem. Perbedaan densitas fluida terjadi karena adanya gradien suhu pada fluida. Contoh konveksi alamiah antara lain adalah aliran udara yang melintasi radiator panas (McCabe, 1993).

b. Konveksi Paksa (*Forced Convection*)

Merupakan proses perpindahan panas yang terjadi karena adanya bantuan dari luar, misalnya pengadukan. Jika dalam suatu alat tersebut dikehendaki pertukaran panas, maka perpindahan panas terjadi secara konveksi dipaksa karena laju panas yang dipindahkan naik dengan adanya pengadukan (McCabe, 1993).

2.8.3 Perpindahan Panas secara Radiasi

Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan), absorpsi (diserap) dan menjadi kalor, hal itu tergantung pada jenis benda. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari. Menurut Hukum Stefan Boltzmann tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan (dari benda hitam) dengan 5 laju yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan benda (Artono Koester, 2002).

Terdapat hubungan matematik pada perpindahan kalor secara radiasi yang dikenal dengan Hukum Stefan – Boltzmann :

$$q_r = \epsilon \sigma A T^4 \dots\dots\dots \text{pers 6}$$

Dimana :

- ε = emisivitas ; 0 - 1 (bergantung pada jenis permukaan, jika benda hitam sempurna maka $\varepsilon = 1$)
- σ = tetapan Stefan-Boltzmann ; $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- A = suhu permukaan
- T = suhu mutlak permukaan

2.9 Rasio Udara dan Bahan Bakar

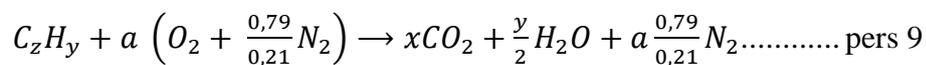
Perbandingan jumlah udara dengan bahan bakar disebut dengan *Air Fuel Ratio* (AFR). Perbandingan ini dapat dibandingkan baik dalam jumlah massa ataupun dalam jumlah volume.

$$AFR = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{V_{fuel}}{V_{air}} \dots\dots\dots \text{pers 7}$$

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) :

$$\phi = \frac{AFR_{sto}}{AFR_{akt}} \dots\dots\dots \text{pers 8}$$

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:



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 :

$$\text{Rasio Udara} = \frac{(\text{Jumlah Udara Pembakaran aktual})}{(\text{Jumlah Udara pembakaran teoritis})} = \frac{(21)}{(21 - \%O_2)} \dots \text{pers 10}$$

$$\% \text{ Excess air} = \frac{\% O_2}{21 - \% O_2} \times 100 \% \dots \text{pers 11}$$

Jumlah udara aktual 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.

2.10 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*).

a. 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 2 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	0c	-	340	
	T 95	0C	-	360	
	Titik Didih Akhir	0c	-	370	
6	Titik Nyala	0c	55	-	D 93 799c
7	Titik Tuang	0c	-	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	0c	55	-	D 93 799c
12	Titik Tuang	0c	-	18	D 97
13	Residu Karbon	% mm	-	0,30	D 4530 – 93

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

b. LPG

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).

Dalam kondisi atmosfer, LPG akan berbentuk gas. Volume LPG dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu LPG dipasarkan berbentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan.

Tabel 3 Spesifikasi LPG

<i>Description</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Specific Gravity at 60/60 °F</i>	<i>To be reported</i>	
<i>Vapour pressure 100°F psig</i>	-	120
<i>Weathering test at 36°F %Vol</i>	95	-
<i>Copper Corrosion 1 hrs 100 ° F</i>	-	ASTM No.1
<i>Total Sulphur, grains/100 cuft</i>	-	
<i>Water content</i>	<i>Free of water</i>	<i>Free of water</i>
<i>Komposisi :</i>		<i>D-2163 Test</i>
<i>C2 % vol</i>	-	0.2
<i>C5 + (C5 and heavier) % vol</i>	97.5	-
<i>thyl or Buthyl mercaptan added ml/100 AG</i>		50

(Sumber: Pertamina (2005))

2.10.1 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*:

$$\text{HHV} = 33950 + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \dots\dots\dots \text{pers 12}$$

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:

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2400 (M + 9 H_2) \dots\dots\dots \text{pers 13}$$

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 (HVV), sedangkan peraturan SAE (*Society of Automotive Engineers*) menentukan penggunaan nilai kalor bawah (LHV).