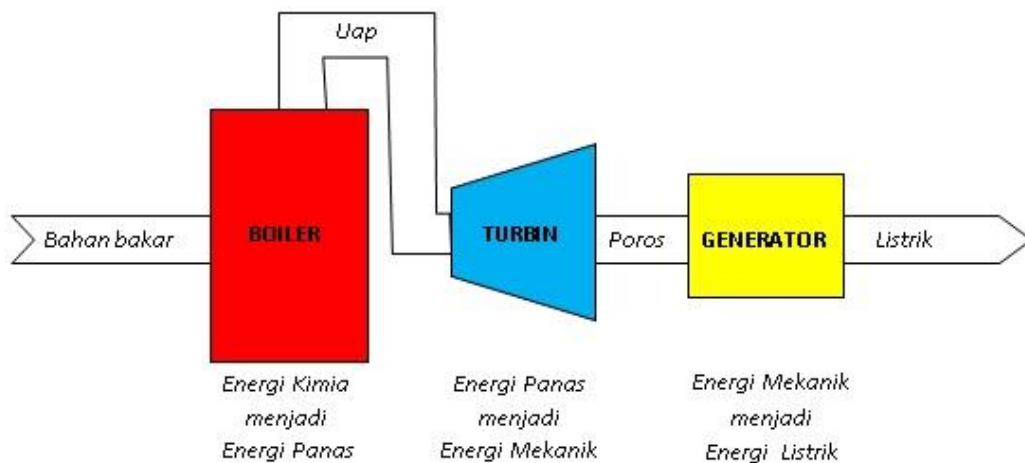


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU adalah jenis pembangkit listrik tenaga termal yang banyak digunakan, karena efisiensinya tinggi sehingga menghasilkan energi listrik yang ekonomis. PLTU merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik. Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui 3 tahapan, yaitu:

1. Pertama, energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi.
2. Kedua, energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.
3. Ketiga, energi mekanik diubah menjadi energi listrik.



Gambar 4. Proses Konversi Energi pada PLTU

(Sumber : Rakman, Alief, 2013)

2.1.1 Komponen Peralatan Sistem Tenaga Uap

2.1.1.1 Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau *steam*. Air panas atau *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 1.600 kali, menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan sangat baik. (UNEP, 2008)

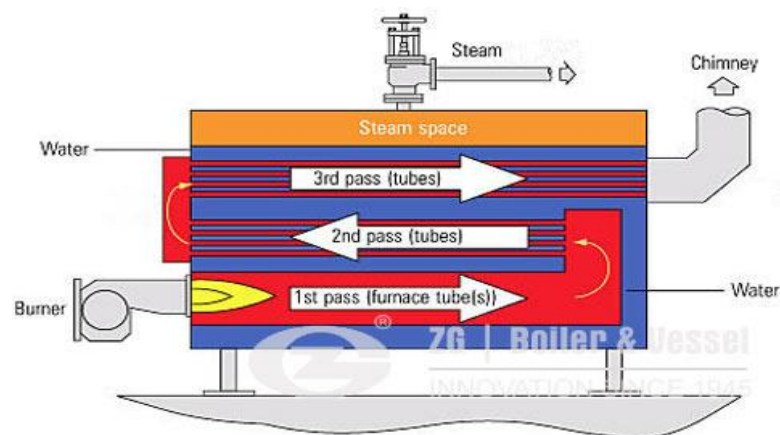
Sistem *boiler* terdiri dari: sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* 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 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. Dua sumber air umpan adalah: (1) Kondensat atau *steam* yang mengembun yang kembali dari proses dan (2) Air *makeup* (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan *plant* proses. Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan *economizer* untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang.

Boiler yang dirancang untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap, uap yang dihasilkan harus mempunyai kemampuan untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik yang bertegangan tinggi. 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 didih, 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 adalah-uap mempunyai panas dan mempunyai energi potensial. Energi potensial dirubah menjadi energi kinetik dan selanjutnya dirubah lagi menjadi energi mekanik dan yang di hasilkan adalah energi listrik.

1. Jenis-Jenis *Boiler* Berdasarkan Tipe Pipa

a. *Fire Tube Boiler*

Tipe boiler pipa api memiliki karakteristik menghasilkan kapasitas dan tekanan *steam* yang rendah. Prinsip kerjanya yaitu proses pengapian terjadi didalam pipa, kemudian panas yang dihasilkan dihantarkan langsung kedalam *boiler* yang berisi air. Besar dan konstruksi *boiler* mempengaruhi kapasitas dan tekanan yang dihasilkan *boiler* tersebut. Sebagai pedoman, *fire tube boilers* kompetitif untuk kecepatan *steam* sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boilers* dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar *fire tube boilers* dikonstruksi sebagai “paket” *boiler* (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



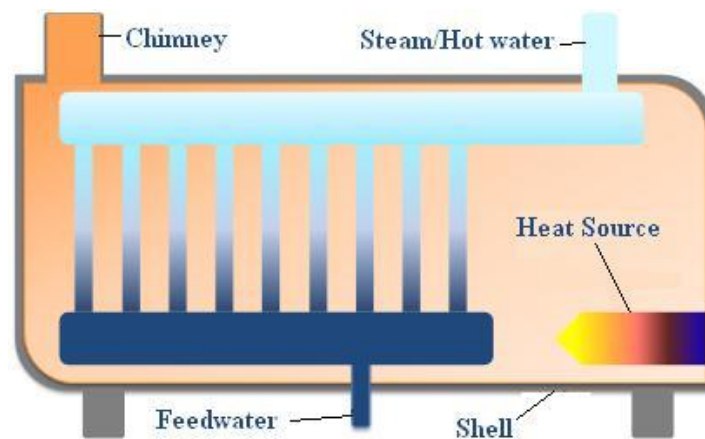
Gambar 5. *Fire Tube Boiler*

(Sumber: Murni, 2012)

b. *Water Tube Boiler*

Tipe *boiler* pipa air memiliki karakteristik menghasilkan kapasitas dan tekanan *steam* yang tinggi. Prinsip kerjanya yaitu proses pengapian terjadi diluar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa yang berisi air dan sebelumnya air tersebut dikondisikan terlebih dahulu melalui *economizer*, kemudian *steam* yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam sebuah *steam drum*. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, melalui tahap *secondary superheater* dan *primary superheater* baru *steam*

dilepaskan ke pipa utama distribusi. Didalam pipa air, air yang mengalir harus dikondisikan terhadap mineral atau kandungan lainnya yang larut di dalam air tersebut. Hal ini merupakan faktor utama yang harus diperhatikan terhadap tipe ini. *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.



Gambar 6. Water Tube Boiler

(Sumber: Murni, 2012)

Tabel 1. Keuntungan dan Kerugian *Boiler* Berdasarkan Tipe Pipa

No.	Tipe <i>Boiler</i>	Keuntungan	Kerugian
1	<i>Fire Tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Proses pemasangan mudah dan cepat, tidak membutuhkan <i>setting</i> khusus - Investasi awal <i>boiler</i> ini murah - Bentuknya lebih <i>compact</i> dan <i>portable</i> - Tidak membutuhkan area yang besar untuk 1 <i>HP boiler</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - Tekanan operasi <i>steam</i> terbatas untuk tekanan rendah 18 bar - Kapasitas <i>steam</i> relatif kecil (13.5 TPH) jika dibandingkan dengan <i>water tube</i> - Tempat pembakarannya sulit dijangkau untuk dibersihkan, diperbaiki, dan diperiksa kondisinya. - Nilai efisiensinya rendah, karena banyak energi kalor yang terbuang langsung menuju <i>stack</i>
2	<i>Water Tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Kapasitas <i>steam</i> besar sampai 450 TPH - Tekanan operasi mencapai 100 bar - Nilai efisiensinya relatif lebih tinggi dari <i>fire tube boiler</i> - Tungku mudah dijangkau untuk melakukan pemeriksaan, pembersihan, dan perbaikan 	<ul style="list-style-type: none"> - Proses konstruksi lebih detail - Investasi awal relatif lebih mahal - Penanganan air yang masuk ke dalam <i>boiler</i> perlu dijaga, karena lebih sensitif untuk sistem ini, perlu komponen pendukung untuk hal ini

(Sumber: Anonim, 2014)

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 harus 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*. Berbagai kran (*Valve*) disediakan untuk mempermudah pengaturan pada saat alat dioperasikan. Sistem *steam* 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 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 *economizer* untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang pada Cerobong (*stack*) (UNEP,2008). Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pengoperasian *boiler* :

a. 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.

b. 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*.

c. 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.

d. 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 padat, cair atau gas. Banyak uap harus dihasilkan tiap jamnya, ratusan atau bahkan jutaan pon tiap jamnya juga perlu dipertimbangkan dalam desain.

e. 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.

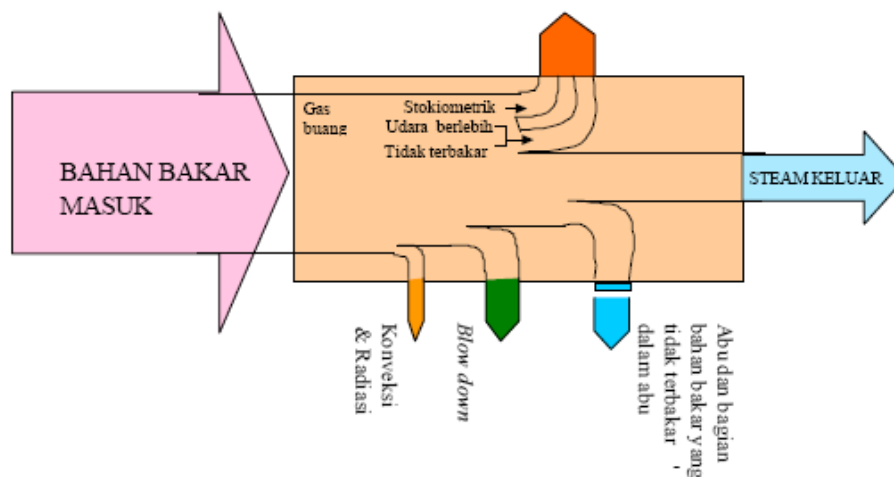
f. Pengolahan Air Umpan *Boiler*

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.

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*. 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 13 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.

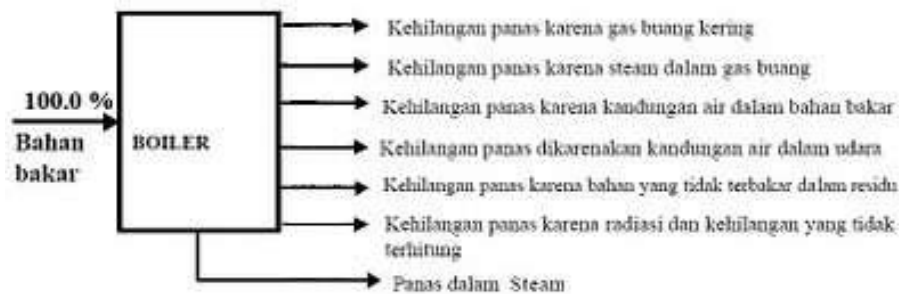


Gambar 7. Sistem Neraca Massa dan Panas

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2008)

Gambar 7 merupakan diagram neraca energi yang menggambarkan keseimbangan energi total yang masuk boiler terhadap yang meninggalkan

boiler dalam bentuk yang berbeda. Gambar 8 memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan steam.



Gambar 8. Rugi-Rugi pada Boiler

Sumber: United Nations Environment Programme (UNEP) (2008)

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).

4. Kehilangan Energi pada *Boiler*

Berdasarkan asas 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 dibanding efisiensi diatas. Banyak variabel 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 10 poin penting perlu dilakukan pada saat pengoperasian sistem *boiler*.

a. Rasio Udara – Bahan Bakar

Perbandingan udara bahan bakar merupakan parameter terpenting yang berpengaruh terhadap efisiensi *boiler*. Presentase perbandingan udara dinyatakan sebagai $AF/AF_{teoritis} \times 100$. Presentase perbandingan udara pembakaran yang berlebih merupakan penyebab utama menurunnya efisiensi *boiler* dikarenakan terlalu banyaknya energi yang dikonveksi 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 presentase udara teoritis tertentu ditimbulkan oleh kandungan energi sensibel pada gas bekas. Penurunan efisiensi akan lebih terasa pada presentase udara rendah dibanding presentase 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 dibanding 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 Cb dapat dihitung melalui persamaan:

$$C_b = C - C_r$$

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:

$$\text{Persentase Kelebihan Udara} = \frac{(p) - (d)}{(0,01) - (d)}$$

Dimana :

p = Angka perbandingan udara bahan bakar aktual

d = Angka perbandingan udara bahan bakar teoritis

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 ultisasi 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:

$$\frac{A}{F} = \frac{\text{Massa O}_2 \text{ yang dibutuhkan dari udara per kg bahan bakar}}{0,232}$$

(Sumber: Archie W. Culp Jr dan Darwin Sitompul. 1991)

Dimana:

F = Jumlah bahan bakar (kg)

A = Udara pembakaran (kg)

Faktor 0,232 merupakan fraksi massa oksigen dalam udara.

b. 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 titik akhir proses pertukaran kalor. Dengan kata lain, apabila boiler dilengkapi dengan *feedwater economizer*, maka sensor terletak pada sisi keluar *economizer*. 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.. Secara mendasar, terdapat dua penyebab tingginya suhu cerobong, yaitu tidak cukupnya luasan permukaan dan terdapatnya endapan kerak pada permukaan *heat-transfer*.

c. 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 terdapat penghematan sekitar ½% bahan bakar setiap penurunan tekanan 35 psig. Tetapi hal ini dapat dipahami bahwa dengan tekanan kerja yang rendah akan menurunkan suhu gas bekas dikarenakan meningkatnya proses *heat transfer*, menurunkan kerugian kalor dari *boiler* dan perpipaan serta menurunkan tingkat kebocoran uap karena tekanan lebih rendah.

d. 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 dial-termometer, sedangkan viskositas dapat diukur dengan menggunakan *portable viscometer*. Sebagai contoh untuk mendapatkan viskositas antara 100 – 300 SUS memerlukan pemanasan bahan bakar antara 100 sampai 110 °C untuk *grade* no 6 dan 70 sampai 80 °C untuk *grade* no 4. Dengan menaikkan suhu bahan bakar untuk mendapatkan atomisasi yang sempurna, dapat diperoleh penghematan hingga 5 %.

e. 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%.

f. Pengendalian *Boiler* Tunggal

Boiler bisa saja bekerja dengan 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.

g. Proses *Blowdown*

Air harus secara kontinu ditambahkan ke dalam boiler untuk menggantikan uap yang diproduksi. Padatan yang terkandung didalam *make-up water* semakin menambah konsentari 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) *Continous blowdown* atau *kimming blowdown* dimaksudkan untuk mengeluarkan padatan yang terkandung dalam air.

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:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi Boiler } (\eta) &= \frac{\text{Panas yang Diinginkan}}{\text{Panas Masuk}} \times 100 \\ \text{Efisiensi Boiler } (\eta) &= \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{GCV}} \times 100 \\ \text{Efisiensi Furnace } (\eta) &= \frac{q \text{ konveksi}}{q \text{ Bahanbakar}} \times 100 \\ \text{Efisiensi Thermal Boiler } (\eta) &= \frac{\text{Kualitas Steam}}{q \text{ Bahanbakar}} \times 100 \end{aligned}$$

(Sumber : Suwasano, Agus, 2011)

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 kotor bahan bakar (GCV) dalam kkal/kg bahan bakar.

Dimana :

h_g = Entalpi *Steam* jenuh dalam kkal/kg *steam*

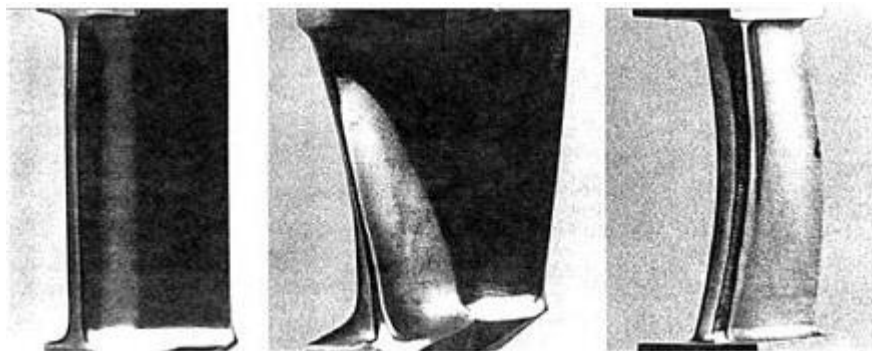
h_f = Entalpi air umpan dalam kkal/kg air

2.1.2.2 Turbin Uap

Turbin Uap adalah mesin penggerak yang merubah secarlangsung energi yang terkandung dalam uap menjadi gerak putar pada poros. Yang mana uap (*steam* yang diproduksi dari ketel uap/boiler) setelah melalui proses yang dikehendaki maka uap yang dihasilkan dari proses tersebut dapat digunakan untuk memutar turbin melalui alat memancar (*nozzle*) dengan kecepatan *relative*, dimana kecepatan *relative* tersebut membentur sudu penggerak sehingga dapat menghasilkan putaran. Uap yang memancar keluar dari nosel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan dan dipasang disekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah antara sudu turbin itu dibelokkan kearah mengikuti lengkungan dari sudu turbin. Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar roda dan poros.

Jika uap masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin berarti hanya sebagian yang energi kinetis dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin

yang berjalan. Supaya energi kinetis yang tersisa saat meninggalkan sudu turbin dimanfaatkan maka pada turbin dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Sebelum memasuki baris kedua sudu gerak. Maka antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*guide blade*) yang berguna untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat. Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetis yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Komponen turbin uap yang paling penting adalah sudu-sudu, karena di sudu-sudu inilah sebagian besar energi uap panas ditransfer menjadi energi mekanik. Gambar bentuk sudu sudu turbin uap dapat dilihat pada Gambar 9.

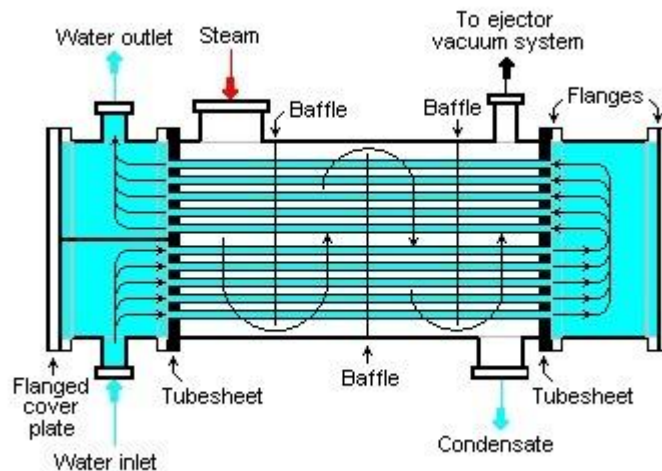


Gambar 9. Bentuk sudu sudu turbin uap.

(Sumber : Anonim, 2011)

2.1.1.3 Kondensor

Proses konversi energi dari satu energi menjadi energi lainnya untuk mesin-mesin panas selama transfer energi selalu ada transfer panas pada fluida kerja. Jadi 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. Di dalam kondensor semua energi dilepaskan ke fluida pendingin. Diagram penampang condenser dapat dilihat pada Gambar 10.



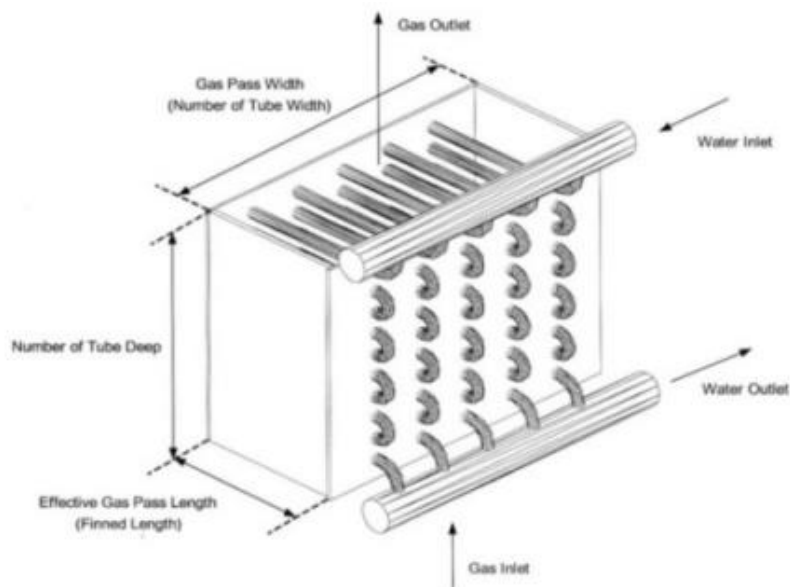
Gambar 10. Penampang Kondenser

(Sumber : Onny, 2017)

2.1.1.4 Ekonomiser

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 ke luar 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 disinggung 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. Komponen ekonomiser dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Penampang Ekonomiser

(Sumber : Muhammad, S. A. et al, 2009)

2.1.1.5 Generator

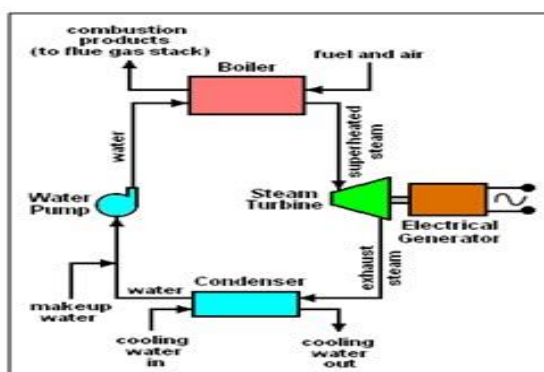
Generator merupakan instrumen pembangkit tenaga listrik yang mengubah energi mekanis sebagai masukan menjadi energi listrik sebagai keluaran dimana kecepatan putar dari rotornya sama dengan kecepatan putar dari statornya. Generator terdiri dari bagian yang berputar yang disebut rotor dan bagian yang diam yang disebut stator. Kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup dari suatu penghantar, bila diberi tegangan arus searah akan menimbulkan *fluks* magnet. Rotor tersebut diputar dengan suatu penggerak mula atau *prime mover* sehingga fluks tersebut memotong konduktor-konduktor yang ada di stator yang selanjutnya pada kumparan stator akan terimbas tegangan.

2.1.2 Siklus Fluida Kerja pada PLTU

PLTU menggunakan fluida kerja air uap yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut :

1. Pertama, air diisikan ke boiler hingga mengisi penuh seluruh luas permukaan pemindah panas. Didalam boiler air ini dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap.

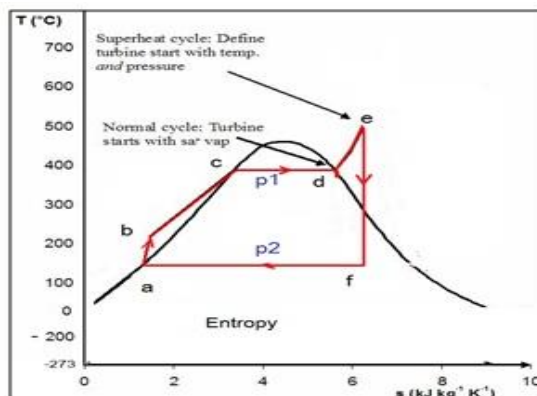
2. Kedua, uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.
3. Ketiga, generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal *output* generator
4. Keempat, uap bekas keluar turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler.
5. Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dan berulang-ulang.



Gambar 12. Siklus fluida kerja sederhana pada PLTU
(Sumber : Rakman, Alief, 2013)

2.1.3 Diagram Siklus Termodinamika pada PLTU

Siklus kerja PLTU yang merupakan siklus tertutup dapat digambarkan dengan diagram $T - s$ (Temperatur – entropi). Siklus ini adalah penerapan siklus rankine ideal. Adapun urutan langkahnya adalah sebagai berikut :



Gambar 13. Diagram T-s Siklus PLTU (Siklus Rankine)

(Sumber : Rakman, Alief, 2013)

1. $a - b$ = Air dipompa dari tekanan P_2 menjadi P_1 . Langkah ini adalah langkah *kompresi isentropis*, dan proses ini terjadi pada pompa air pengisi.
2. $b - c$ = Air bertekanan ini dinaikkan temperaturnya hingga mencapai titik didih. Terjadi di *LP heater*, *HP heater* dan *Economizer*.
3. $c - d$ = Air berubah wujud menjadi uap jenuh. Langkah ini disebut *vapourising* (penguapan) dengan proses *isobar isothermis*, terjadi di boiler yaitu di *wall tube (riser)* dan *steam drum*.
4. $d - e$ = Uap dipanaskan lebih lanjut hingga uap mencapai temperatur kerjanya menjadi uap panas lanjut (*superheated vapour*). Langkah ini terjadi di *superheater* boiler dengan proses *isobar*.
5. $e - f$ = Uap melakukan kerja sehingga tekanan dan temperaturnya turun. Langkah ini adalah langkah *expansi isentropis*, dan terjadi didalam turbin.
6. $f - a$ = Pembuangan panas laten uap sehingga berubah menjadi air kondensat. Langkah ini adalah *isobar isothermis*, dan terjadi didalam kondensor.

2.2 Air

Pada proses di alat Boiler Pipa Air, air digunakan sebagai bahan baku utama untuk menghasilkan uap. Uap tersebut akan digunakan untuk memutar turbin. Hasil perputaran turbin akan menghidupkan generator sehingga dihasilkan listrik. Adapun sifat air secara kimia dan fisika dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisika dan Kimia Air

Sifat Kimia	Sifat Fisika
Bersifat polar karena adanya perbedaan muatan	Tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau.
Sebagai pelarut yang baik karena kepolarannya	Dapat menyerap sejumlah kalor karena memiliki kalor jenis yang tinggi
Bersifat netral (pH=7) dalam keadaan murni.	Tekanan kritis = $22,1 \times 10^6$ Pa.
Keberadaan pasangan elektron bebas pada atom oksigen	Kapasitas kalor = $4,22$ kJ/kg K.

Sumber: Fitriani,diah,dkk (2009)

2.3 Udara

Udara pada boiler pipa air digunakan untuk proses pembakaran. Udara proses dipasok dari kompressor yang mengambil udara dari atmosfer dan kemudian disaring dengan filter udara untuk menghilangkan debu atau kotoran lainnya. Dalam keadaan udara kering komposisi unsur-unsur gas yang terdapat pada atmosfer terdiri atas unsur nitrogen (N_2) 78%, oksigen (O_2) 21%, carbon dioksida (CO_2) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O_3), hidrogen (H), 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. Mengenai sifat-sifat dari udara dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Sifat-sifat Udara

Sifat	Nilai
Densitas pada $0^\circ C$	$1292,8$ kg/m ³
Temperatur kritis	$-140,7$ $^\circ C$
Tekanan kritis	$37,2$ atm
Densitas kritis	350 kg/m ³
Panas jenis pada $1000^\circ C, 281,65^\circ K$ dan $0,89876$ bar	$0,28$ kal/gr $^\circ C$
Faktor kompresibilitas	1000
Berat molekul	$28,964$
Viskositas	$1,76$ E-5 poise
Koefisien perpindahan panas	$1,76$ E-5 W/m.K
Entalpi pada $1200^\circ C$	1278 kJ/kg

Sumber: Perry's Chemical Engineering Hand's Book (1996)

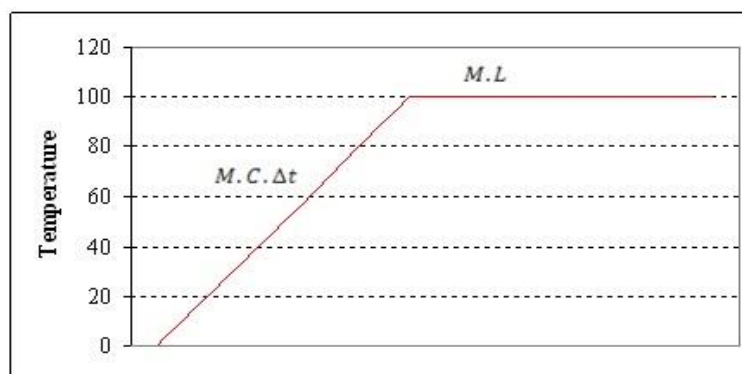
Sifat kimia udara adalah sebagai berikut :

- Mempunyai sifat yang tidak mudah terbakar, tetapi dapat membantu proses pembakaran.
- Terdiri dari 79% mol N_2 dan 21% mol O_2 dan larut dalam air.

2.4 Steam

Steam adalah bahasa teknis dari uap air, yaitu fase gas dari air yang terbentuk ketika air mendidih. Untuk mengubah air dari fase *liquid* (cair) menjadi fase gas (*steam*) diperlukan energi panas untuk menaikkan temperature air yang biasa disebut sebagai “*Sensible Heat*”. Pada tekanan *atmosphere* titik didih air adalah $100^{\circ}C$ ($212^{\circ}F$) sedangkan apabila tekanan pada sistem dinaikan maka energi panas yang diperlukan juga ikut naik.

Pada saat perubahan fase cair menjadi *steam*, temperatur air tidak akan naik meskipun dengan penambahan panas, penambahan panas digunakan untuk merubah *phase* air dari cair ke gas.



Gambar 14. Grafik perubahan fase air

(Sumber : Kurniawan, 2011)

Keterangan :

Q_1 = Energi kalor yang digunakan untuk memanaskan air hingga titik didih

Q_2 = Energi kalor yang digunakan untuk merubah fase air dari cair ke gas

M = Massa (Kg)

C = Kalor Jenis ($J/Kg \cdot ^{\circ}C$)

ΔT = Perubahan Suhu ($^{\circ}C$)

L = Kalor Laten (J/Kg) (banyak kalor untuk merubah wujud suatu zat)

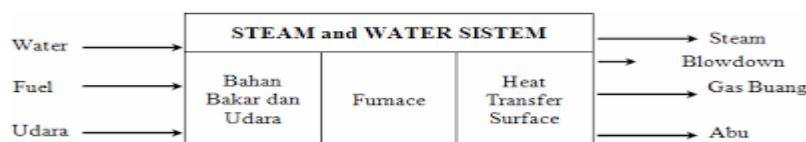
Dari gambar grafik perubahan fase air diatas bisa dilihat bahwa untuk energi kalor yang diperlukan untuk mengubah fase air dari cair ke gas adalah:

$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{Total} = M.C.\Delta t + M.L$$

Steam yang dipanaskan sampai pada temperatur jenuhnya disebut *Dry Saturated Steam*. Sedangkan *steam* yang belum dipanaskan sampai temperature jenuhnya disebut *wet steam*. Presentase air dalam *wet steam* disebut sebagai %*moisture*. Sehingga untuk mendapatkan kualitas *steam* dari *wet steam* adalah:

$$\text{kualitas wet steam} = 100\% - \% \text{moisture}$$



Gambar 15. Proses Terbentuknya Steam

(Sumber : Kurniawan, 2011)

Pada gambar diatas dapat dilihat proses dari terbentuknya *steam*. Campuran bahan bakar (*fuel*) dan udara terjadi pembakaran pada ruang *Furnace Boiler*, sehingga terjadi perpindahan panas menuju air.

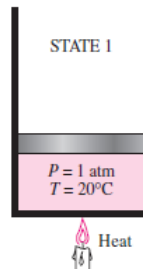
2.4.1 Perubahan Fase pada Zat Murni

Air dapat berada pada keadaan campuran antara cair dan uap, contohnya yaitu pada boiler dan kondenser dari suatu sistem pembangkit listrik tenaga uap. Dibawah ini akan dijelaskan secara lebih rinci mengenai perubahan fase pada zat murni, contohnya air.

2.4.2 Cair Tekan (*Compressed Liquid*)

Untuk memudahkan dalam menjelaskan proses ini maka lihat pada Gambar 3 dimana sebuah alat berupa torak dan silinder yang berisi air pada 20°C dan tekanan 1 atm. Pada kondisi ini, air berada pada fase cair tekan karena temperatur dari air tersebut masih dibawah temperatur saturasi air pada saat tekanan 1 atm. Kemudian kalor mulai ditambahkan kedalam air sehingga terjadi kenaikan temperatur. Seiring dengan kenaikan temperatur tersebut maka air secara perlahan berekspansi dan volume spesifiknya meningkat. Karena ekspansi ini maka piston

juga secara perlahan mulai bergerak naik. Tekanan didalam silinder konstan selama proses karena didasarkan pada tekanan atmosfer dari luar dan berat dari torak (Cengel dan Boles, 1994).

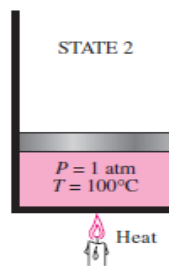


Gambar 16. Air pada Fase Cair Tekan (*Compressed Liquid*)

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

2.4.3 Cair Jenuh (*Saturation Liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100°C . Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian dari air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh (*saturation liquid*) seperti digambarkan pada Gambar 17 (Cengel dan Boles, 1994).

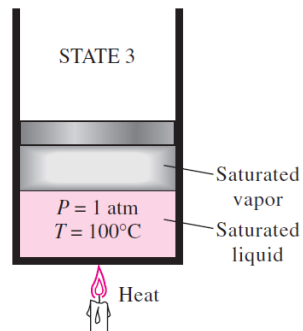


Gambar 17. Air pada Fase Cair Jenuh (*Saturated Liquid*)

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

2.4.4 Campuran Air-Uap (*Liquid-Vapor Mixture*)

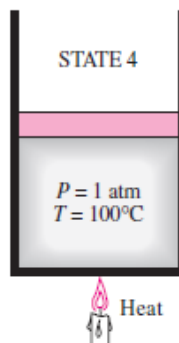
Saat pendidihan berlangsung, tidak terjadi kenaikan temperatur sampai cairan seluruhnya berubah menjadi uap. Temperatur akan tetap konstan selama proses perubahan fase jika temperatur juga dijaga konstan. Pada proses ini volume fluida didalam silinder meningkat karena perubahan fase yang terjadi, volume spesifik uap lebih besar daripada cairan. Sehingga menyebabkan torak terdorong keatas. Kondisi ini dapat digambarkan pada Gambar 18 (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 18. Campuran Air dan Uap
(Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.4.5 Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)

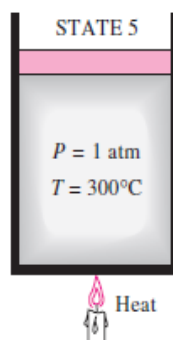
Jika kalor terus ditambahkan, maka proses penguapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada Gambar 19. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 19. Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)
(Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.4.6 Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

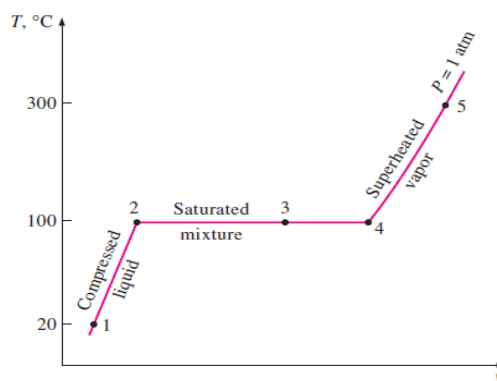
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 20. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap pada tekanan 1 atm yaitu 100°C (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 20. Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

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

Proses diatas digambarkan pada suatu diagram T-v seperti terlihat pada gambar 21.



Gambar 21. Diagram T-v Pemanasan Air pada Tekanan Konstan

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

2.5 Teknik Pembakaran Bahan Bakar

Teknik Pembakaran termofluida terapan yang digunakan untuk menyelidiki, menganalisis serta mempelajari tentang proses pembakaran (*combustion*), bahan bakar (*fuel*), serta sifat dan kelakuan nyala api (*flame*). Bahan bakar yang ditelaah dalam tinjauan pembakaran dapat merupakan bahan bakar gas, cair atau padat.

2.5.1 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 berapa suhu ideal agar

pembakaran dapat terjadi dan bagaimana kondisi aliran fluidanya. Semakin turbulen aliran fluida yang terjadi, maka proses transfer panas juga akan semakin cepat. Pada proses pembakaran dengan proses penyalaan api yang normal, dibutuhkan tiga komponen utama untuk tercapainya suatu fase pembakaran, yaitu:

1. Panas
2. Bahan bakar
3. 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.

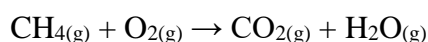
Nyala api yang terbentuk dari proses pembakaran merupakan fenomena yang terjadi dalam fase gas, karena proses pembakaran baru terjadi apabila campuran udara dan bahan bakar sudah berada pada fase yang sama (fase gas). Sehingga pembakaran yang menghasilkan nyala api dengan bahan bakar cair dan padat harus didahului dengan proses perubahan 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 temperatur permukaan tertentu dari cairan itu sendiri.

Selanjutnya, uap hasil vaporisasi 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 tanpa pemantikan menggunakan *electrical spark igniter*.

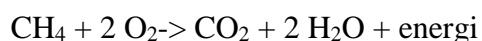
a) Reaksi Oksidasi Pembakaran

Senyawa yang terbentuk dari hasil reaksi dengan oksigen dinamakan oksida sehingga reaksi antara oksigen dan suatu unsur dinamakan reaksi oksidasi. Suatu senyawa alkana yang bereaksi dengan oksigen menghasilkan karbon dioksida dan air disebut dengan reaksi pembakaran. Perhatikan persamaan reaksi oksidasi pada senyawa hidrokarbon berikut :



Reaksi pembakaran tersebut, pada dasarnya merupakan reaksi oksidasi. Pada senyawa metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) mengandung satu atom karbon. Kedua senyawa tersebut harus memiliki bilangan oksidasi nol maka bilangan oksidasi atom karbon pada senyawa metana adalah -4 , sedangkan bilangan oksidasi atom karbon pada senyawa karbon dioksida adalah $+4$. Bilangan oksidasi atom C pada senyawa karbon dioksida meningkat (mengalami oksidasi), sedangkan bilangan oksidasi atom C pada senyawa metana menurun. Alkana dapat mengalami oksidasi dengan gas oksigen, dan reaksi pembakaran ini selalu menghasilkan energi. Itulah sebabnya alkana digunakan sebagai bahan bakar. Secara rata-rata, oksidasi 1 gram alkana menghasilkan energi sebesar 50.000 joule.

b) Reaksi pembakaran sempurna:

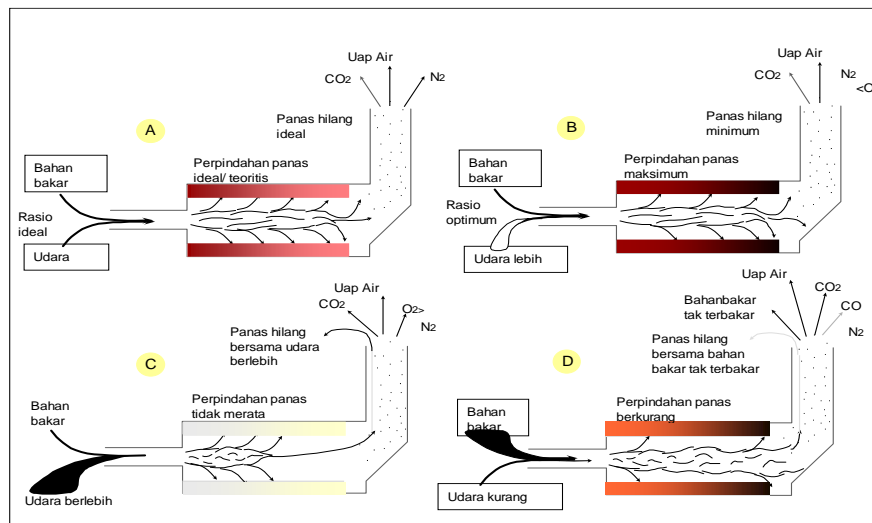


c) Reaksi pembakaran tidak sempurna:



2.5.2 Profil Pembakaran

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



Gambar 22. Profil Pembakaran Bahan Bakar

(Sumber : Anonim, 2011)

Pada Gambar 22 hubungan antara udara berlebih dengan gas-gas hasil pembakaran dapat dijelaskan sebagai berikut :

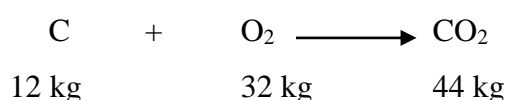
1. Pada laju udara dibawah kebutuhan teoritisnya (titik A), semua karbon dalam bahan bakar tidak semuanya diubah menjadi CO_2 , tetapi lebih banyak CO yang dihasilkan.
2. Dengan menambah udara (titik B), sebagian CO diubah menjadi CO_2 dengan melepas lebih banyak panas. Komposisi CO dalam gas buang turun tajam dan CO_2 meningkat.
3. Pada titik dimana udara stoikiometrik terpenuhi (titik C), semua karbon dapat seluruh nya diubah menjadi CO_2 pada sistem ideal. Kondisi ini tidak pernah dapat dicapai.
4. Operasi pembakaran normal (titik D) pada prakteknya dapat dicapai dengan menam-bah sedikit udara diatas kebutuhan stoikiometriknya (*excess air*) untuk mencapai pembakaran lengkap. Pada kondisi ini, CO_2 pada level maksimumnya, dan produksi CO pada level minimumnya dalam gas buang.
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 temperatur pembakaran dan menyerap panas berguna dalam gas buang.

2.5.3 Kebutuhan Udara Teoritis

Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara yaitu berdasarkan pada satuan berat dan berdasarkan pada satuan volume. Pada suatu analisis pembakaran selalu diperlukan data-data berat molekul dan berat atom dari unsur-unsur yang terkandung dalam bahan bakar.

1. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat

Analisis ini digunakan untuk menghitung kebutuhan teoritis pada pembakaran sempurna sejumlah bahan bakar tertentu. Sebagai contoh:



Ini berarti bahwa setiap kg karbon memerlukan 32 kg oksigen secara teoritis untuk membakar sempurna karbon menjadi karbondioksida. Apabila oksigen yang dibutuhkan untuk membakar masing-masing unsur pokok dalam bahan bakar dihitung lalu dijumlahkan, maka akan ditemukan kebutuhan oksigen teoritis yang dibutuhkan untuk membakar sempurna seluruh bahan bakar. Oleh karena itu untuk memperoleh harga kebutuhan oksigen teoritis yang sebenarnya maka dibutuhkan oksigen yang telah dihitung berdasarkan persamaan reaksi pembakaran kemudian dikurangi dengan oksigen yang terkandung dalam bahan bakar.

2. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

Apabila dalam suatu analisis bahan bakar dinyatakan dalam persentase berdasar volume, maka suatu perhitungan yang serupa dengan perhitungan berdasarkan berat bisa digunakan untuk menentukan volume dari udara teoritis yang dibutuhkan. Untuk menentukan udara teoritis harus memahami Hukum Avogadro yaitu “gas-gas dengan volume yang sama pada suhu dan tekanan standar (0°C dan tekanan sebesar 1 Bar) berisikan molekul dalam jumlah yang sama” (Diklat PLN, 2006). Hal yang penting untuk diingat dalam hukum gas ideal dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kondisi Gas Ideal

Temperatur	Tekanan
0°C	1 atm
273,16 K	760 mmHg
32°F	2992 inHg
491,69°R	14,70 psi

Sumber: Hougen A. Olaf (1961)

2.5.4 Konsep Udara Berlebih (*Excess Air*)

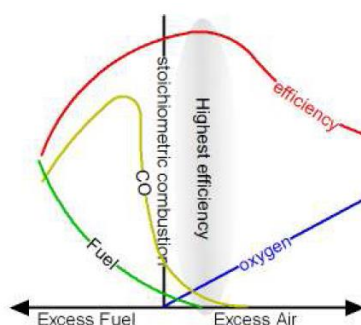
Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O₂ yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari:

1. Komposisi gas buang yang meliputi N₂, CO₂, O₂ dan CO
2. Pengukuran secara langsung udara yang disuplai.

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{udara suplai} - \text{udara teoritis}}{\text{udara teoritis}} \times 100\% \quad (\text{Sumber: Himmelblau (1989)})$$

Efisiensi pembakaran akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah *excess air* hingga pada nilai tertentu, yaitu saat nilai kalor yang terbuang pada gas buang lebih besar daripada kalor yang dapat disuplai oleh pembakaran yang optimal. Ilustrasi mengenai efisiensi pembakaran terhadap nilai *excess air* dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran dengan Udara Berlebih

(Sumber : Anonim, 2009)

Parameter yang diperlukan untuk kualifikasi bahan bakar dan udara didalam sebuah proses pembakaran adalah rasio udara atau bahan bakar, yaitu jumlah udara

di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar = mol udara/mol bahan bakar atau massa udara (kg)/massa bahan bakar (kg).

2.6 Ruang Bakar (*Furnace*)

Ruang bakar atau *furnace* adalah suatu peralatan yang digunakan untuk memanaskan cairan didalam *tube*, dengan sumber panas yang berasal dari proses pembakaran yang menggunakan bahan bakar gas atau cairan secara terkendali didalam *burner*. Tujuan pemanasan ini adalah agar diperoleh kondisi operasi (suhu) yang diinginkan pada proses berikutnya dalam suatu peralatan yang lain. Supaya proses pemanasan berlangsung optimal, maka *tube-tube furnace* dipasang atau diatur sedemikian rupa sehingga panas yang dihasilkan dari pembakaran dapat dimanfaatkan.

2.6.1 Bagian-bagian *Furnace*

1. Bagian radiasi

Terdiri dari ruang pembakaran dimana tube ditempatkan di sekeliling ruang bakar. Masing-masing *tube* dihubungkan dengan elbow. Fluida proses disirkulasikan di dalam rangkaian *tube*, dan panas ditransfer dari bahan bakar secara radiasi. Sebagian panas ditransfer secara konveksi antara udara dan bahan bakar yang panas dengan *tube*. Suhu flue gas (gas buang) yang keluar dari bagian radiasi cukup tinggi (berkisar antara 700 s.d. 1100°C).

2. Bagian konveksi

Untuk *recovery* panas *sensible* dari *flue gas*, maka fluida proses disirkulasikan pada kecepatan tinggi melalui rangkaian *tube* yang dipasang secara parallel maupun tegak lurus, pada suatu bagian dimana panas ditransfer secara konveksi. *Tube* kadang-kadang diberi sirip untuk memperluas permukaan transfer panas dengan *flue gas*. Efisiensi *furnace* dengan bagian konveksi akan lebih besar daripada *furnace* yang hanya dengan bagian radiasi saja.

3. *Stack*

Berfungsi untuk mengalirkan gas hasil pembakaran (*flue gas*) ke udara bebas. Bagian konveksi pada *furnace* biasanya terletak di bagian atas. *Tube* di bagian

radiasi, ditempatkan di depan dinding isolasi *refractory furnace*. Antara *tube* dengan dinding *furnace* dipisahkan dengan oleh ruang kosong dengan jarak sekitar satu kali diameter *tube*. Meskipun panas yang diterima tube tidak terdistribusi secara merata, panas radiasi akan menjangkau keseluruhan permukaan *tube*. Tekanan di dalam *furnace* dijaga negatif di bawah tekanan atmosfer demi keamanan. Tekanan dalam *furnace* diatur dengan *stack draft*, atau kadang-kadang dengan *draft fan*, yang berada di atas bagian konveksi atau diletakkan di tanah di samping *furnace*. Pembakaran udara dilakukan di *burner* di dalam ruang bakar di bawah tekanan atmosfer (*natural draft burner*). Untuk memperoleh pembakaran yang sempurna, perlu ditambahkan udara *excess* sesuai dengan perbandingan stoikiometrinya. Secara umum penggunaan udara *excess* dinyatakan dalam persen (%) stoikiometri, seperti ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5. Penggunaan Udara *Excess*

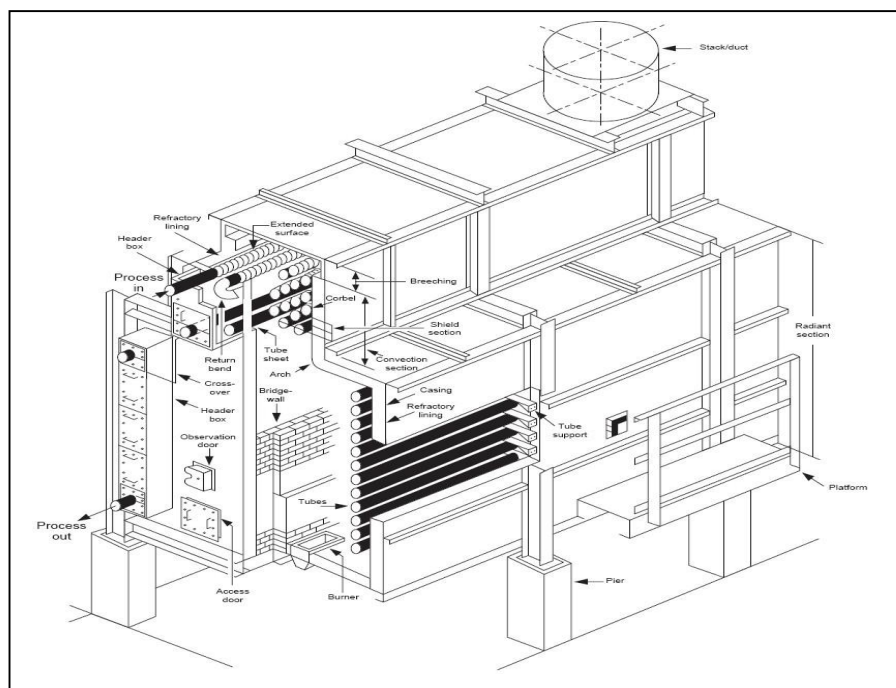
Bahan bakar	Udara dingin (20 ⁰ C)	Udara panas (300 ⁰ C)
Fuel oil	20 – 25	5 – 15
Gas	10 – 15	5 – 1

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

2.6.2 Tipe – Tipe *Furnace*

1. *Furnace tipe box*

Merupakan *furnace* yang konfigurasi strukturnya berbentuk *box*. Terdapat berbagai desain yang berbeda untuk *furnace tipe box*. Desain ini meliputi berbagai macam variasi dari konfigurasi *tube coil*, yaitu horizontal, vertikal, helikal dan *arbor*. Gambar 24 memperlihatkan salah satu jenis *furnace tipe box* dengan *coil horizontal* dan diperlihatkan beberapa komponen utamanya.



Gambar 24. Furnace Tipe Box

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

Tube dalam seksi radiasi dalam *furnace* disebut *tube* radian/ *radiant tube*. Panas yang diambil oleh tube-tube ini terutama diperoleh langsung secara radiasi dari nyala api dan dari pantulan panas *refractory*. *Shield tube*/ tube pelindung biasanya ditempatkan pada bagian bawah seksi konveksi. Karena *tube-tube* ini menyerap baik panas radian maupun panas konveksi, maka *tube-tube* tersebut akan menerima kerapatan panas yang tertinggi.

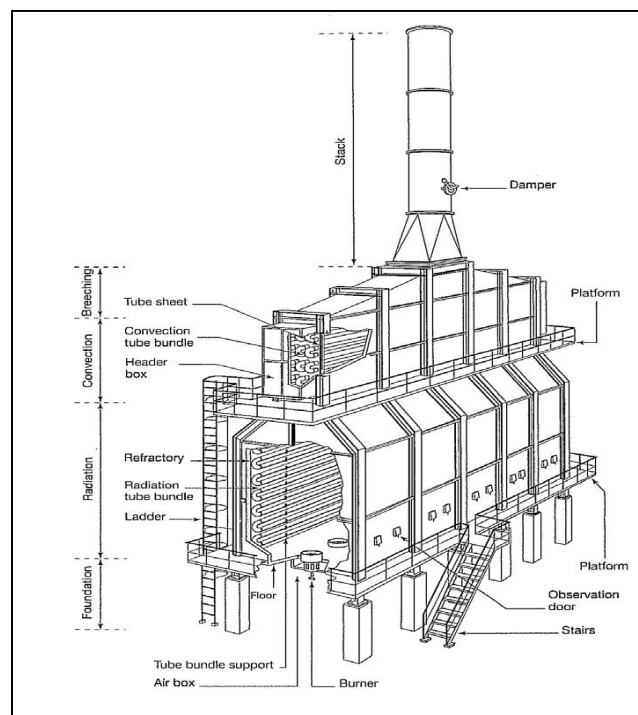
Daerah dengan *heat density* (kepadatan panas) yang lebih rendah adalah seksi konveksi. *Tube* pada seksi ini disebut *tube* konveksi/ *convection tube*. Panas dalam seksi konveksi berasal dari panas hasil pembakaran yang melalui seksi konveksi. Ukuran dan susunan *tube* dalam *heater tipe box* ditentukan oleh tipe operasi *heater*, misalnya distilasi *crude oil* atau *cracking*, jumlah panas yang diperlukan, dan jumlah aliran yang melalui *tube*. *Furnace tipe box* dapat berbentuk *up-draft* (arah *flue gas* ke atas) atau *down-draft* (arah *flue gas* ke bawah), dengan *burner gas (fuel gas)* atau minyak (*fuel oil*) yang ditempatkan di sisi dinding, di lantai, di atap atau kombinasinya. Setelah *tube* konveksi yang dipasang di seksi konveksi, *tube* pelengkap biasanya dipasang untuk

memanaskan udara *burner* atau membangkitkan *steam superheated* untuk keperluan proses atau lainnya.

2. *Furnace Tipe Cabin*

Merupakan *furnace* yang strukturnya berbentuk seperti kabin. Terdiri dari bagian konveksi dan radiasi. *Burner* terletak pada lantai bawah dan nyala api tegak sejajar dengan dinding *furnace*. *Tube-tube furnace* di daerah radiasi, umumnya tersusun horizontal, tetapi ada juga yang vertikal.

Dua barisan pipa terbawah dibagian konveksi merupakan “*Shield*” (shield section). Dapur cabin mempunyai efisiensi lebih tinggi dari pada dapur jenis lain. Dapur ini sering dijumpai di industri. Kapasitas maksimum yang dicapai 120 mm BTU. Gambar 25 memperlihatkan salah satu jenis *furnace tipe cabin* dan diperlihatkan beberapa komponen utamanya.



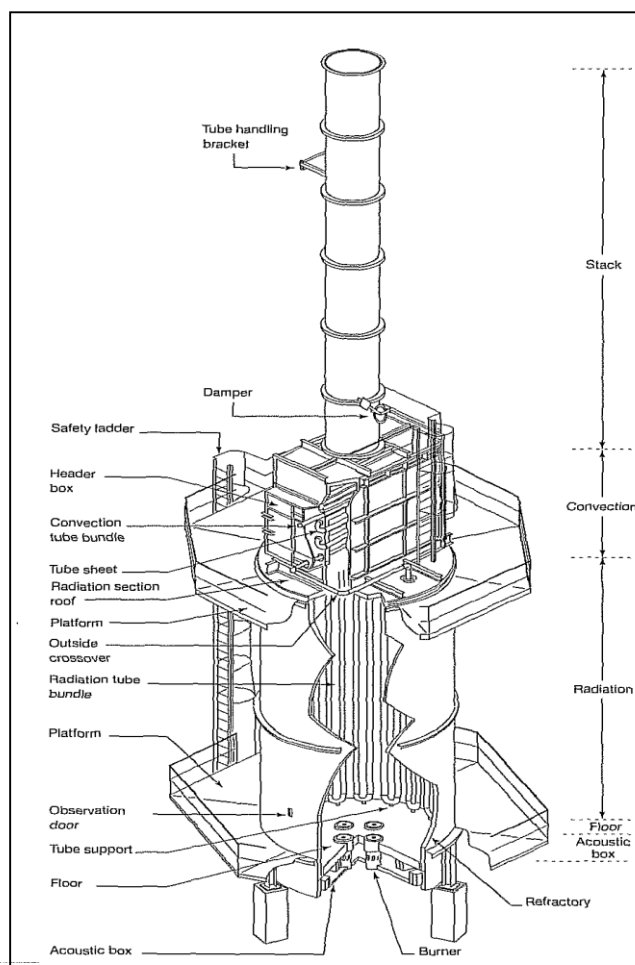
Gambar 25. *Furnace tipe cabin* (P. Trambouze)

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

3. *Furnace tipe silinder vertikal*

Dapur silinder vertikal (*vertical cylindrical furnace*) merupakan dapur yang berbentuk silinder tegak. *Burner* terletak pada lantai dapur dengan nyala api tegak sejajar dengan dinding *furnace*. *Tube-tube furnace* di daerah radiasi

terpasang tegak melingkar mengelilingi *burner*. Panas dipancarkan secara radiasi di bagian silinder. Bagian konveksi berada di atas bagian radiasi. Diantara bagian radiasi dan konveksi dipasang kerucut untuk menyempurnakan radiasi (*Reradiating Cone*). Dapur ini biayanya murah dan harga bahan bakarnya rendah. Pemanasan yang diperlukan tidak begitu tinggi dengan kapasitas maksimum 70 mm BTU.



Gambar 26. Furnace tipe silinder vertikal (P. Trambouze)

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

Selain ketiga jenis *furnace* di atas masih terdapat beberapa tipe *furnace* berdasarkan susunan dari tube di bagian radiasi dan konveksi antara lain sebagai berikut :

4. *Furnace* dengan *Coil Vertical*

Furnace dengan *coil vertical*, casingnya dapat berbentuk silindrikal maupun

box. Sebagian besar *coil* pemanasnya berupa *tube* vertikal. Dalam beberapa instalasi, seksi ekonomiser minyak (*oil economizer*), seksi pemanas udara (*air preheater*), atau keduanya dipasang di atas seksi pemanas vertikal. *Tube* dalam seksi konveksi dapat berupa susunan vertikal maupun horizontal. Tujuan dari seksi ekonomiser dan pemanas udara adalah untuk memperbaiki keekonomian operasi dengan meningkatkan efisiensi thermal.

5. **Furnace dengan Coil Helikal**

Furnace coil helikal adalah *heater* yang *casingnya* berbentuk silindrikal dengan *coil* berbentuk *spiral* pada seksi radian mengikuti bentuk dinding *heater*. *Heater* ini umumnya tidak memiliki seksi konveksi, tetapi bila ada, permukaan konveksi dapat berbentuk spiral datar (*flat spiral*) atau berbentuk suatu *bank tube horizontal*. *Stack* dari *heater coil* helikal kebanyakan terletak langsung di atas *heater*.

6. **Furnace dengan Coil Arbor**

Furnace coil arbor kebanyakan digunakan pada unit *catalytic reforming* untuk keperluan *preheat* dan *reheat* untuk gas dan udara proses. *Heater* ini mempunyai seksi radian yang terdiri dari header inlet dan outlet yang dihubungkan dengan tube berbentuk L atau U dengan susunan paralel. Seksi konveksi berupa *coil tube* horizontal konvensional.

2.6.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi proses operasi *furnace*

2.6.3.1 *Draft*

Draft adalah tekanan negatif yang diakibatkan oleh pengembangan gas yang mengalami pemanasan di dalam *furnace*. Tekanan di dalam *furnace* menjadi negatif karena gas yang panas memiliki densitas yang lebih kecil dibandingkan dengan udara di luar. Gas-gas yang panas, beratnya lebih rendah dibandingkan dengan udara yang suhunya lebih dingin sehingga mengembang di dalam *furnace*. Pengembangan ini menyebabkan gas naik ke atas dan keluar melalui *stack* dan menghasilkan kondisi *vacuum* di dalam *furnace*. Kondisi *vacuum* ini menyebabkan udara yang ada di luar mengalir ke dalam melalui register udara.

Tekanan udara atmosfer sebesar 14,7 psi. Tekanan negatif adalah semua tekanan di bawah 14,7 psi. Perbedaan antara tekanan udara luar dengan tekanan negatif ini akan menghasilkan *draft*.

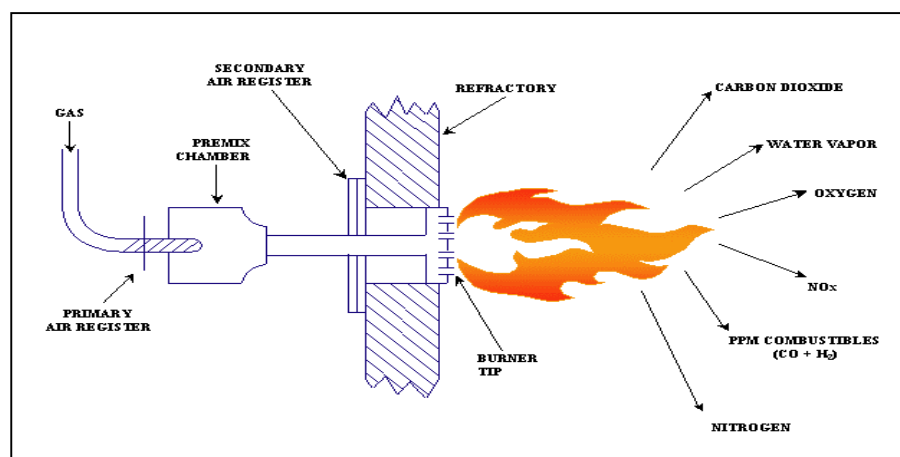
Draft biasanya diukur di tiga tempat : di lantai *firebox*, sebelum bagian konveksi dan di bawah *stack damper*. Pembacaan *draft* yang paling penting berada di bawah bagian konveksi karena tekanan negatif yang paling kecil berada di sini. Tekanan negatif yang kecil juga berhubungan dengan susunan *tube* yang ada di bagian konveksi yang menghalangi aliran gas yang naik ke atas. Hambatan aliran ini dapat menyebabkan tekanan di bagian konveksi menuju *shift* berubah dari sedikit negatif menjadi sedikit positif. Jika tekanan *shift* positif maka terjadi *loss draft*. Kehilangan *draft* menyebabkan panas terbentuk dan terkumpul hanya di bawah *furnace arch* yang dapat menyebabkan kerusakan struktur *furnace*. *Loss draft* juga berarti tidak ada udara yang tertarik ke dalam *furnace* sehingga burner padam.

Furnace draft biasanya dikontrol dengan posisi bukaan damper yang ada di *stack*. *Damper* yang terbuka memungkinkan lebih banyak *flue gas* yang mengalir melewati *stack*, yang pada akhirnya menaikkan *draft* dalam *furnace*. Kenaikan *draft* diukur sebagai kenaikan tekanan negatif. Jika damper ditutup *draft* akan turun. Hal ini diukur sebagai penurunan tekanan negatif. Pengaturan *draft* merupakan hal yang penting dalam operasi. *Draft* yang terlalu kecil menyebabkan burner mati dan kerusakan struktur *furnace*. *Draft* yang terlalu besar menyebabkan jumlah udara *excess* yang masuk ke dalam *furnace* terlalu besar yang menyebabkan pemborosan bahan bakar.

2.6.3.2 Operasi Burner

Pada prinsipnya *burner* adalah *transducer* yang berguna untuk mengubah satu bentuk energi ke bentuk energi yang lain. Dalam kasus ini *burner* berfungsi untuk mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar, menjadi energi panas di dalam *furnace* melalui suatu reaksi kimia dalam nyala api. Kunci utama burner adalah untuk membakar bahan bakar seefisien mungkin dan menghasilkan *heat flux* yang optimum.

Pada *premix burner* konvensional, seperti terlihat pada Gambar 27, bahan bakar dicampurkan dengan udara primer yang mengalir ke dalam *burner*. Aliran udara primer harus dimaksimalkan tanpa menaikkan tinggi nyala api dalam burner. Udara primer mengalir dalam burner bersama-sama dengan bahan bakar. Jumlah udara sekunder yang masuk diatur dengan register udara. Suplai udara sekunder diatur untuk mendapatkan *set point* O_2 yang diinginkan. Setting burner yang benar dan ditambah dengan pencampuran udara dan bahan bakar yang baik akan menghasilkan suhu nyala api yang maksimal serta bentuk nyala yang baik (padat dan mengerucut). Udara sekunder yang terlalu banyak ataupun terlalu sedikit akan menghasilkan pembakaran yang buruk. Sejumlah kecil udara *excess* diperlukan untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna, sebaliknya terlalu banyaknya udara *excess* akan menurunkan suhu nyala api dan efisiensi *furnace*.



Gambar 27. Premix burner dan produk pembakaran

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

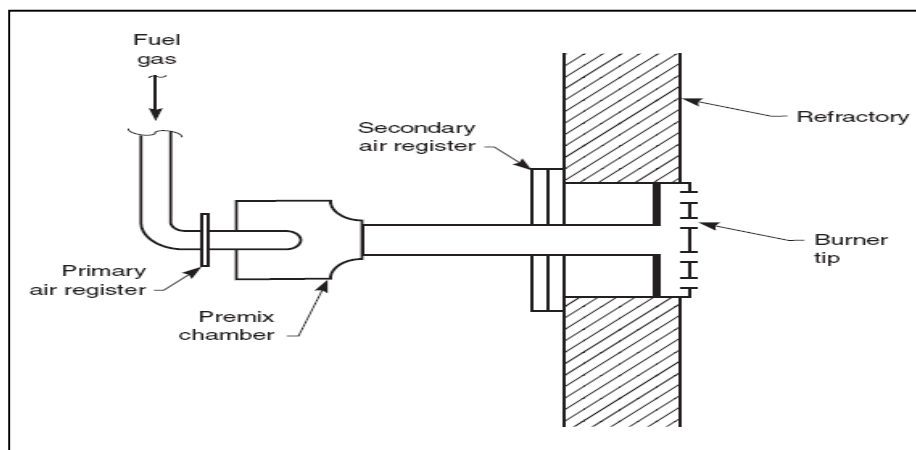
2.6.3.3 Produksi Nox

Emisi NO_x merupakan isu yang sangat penting saat ini. NO_x terbentuk akibat reaksi oksigen dengan nitrogen pada suhu nyala api yang tinggi. Udara *excess* yang rendah adalah cara yang paling sederhana untuk menurunkan pembentukan NO_x dan meningkatkan efisiensi. Semakin banyak udara *excess*, semakin banyak pula oksigen yang tersedia untuk memproduksi NO_x .

2.6.3.4 Efisiensi pencampuran udara dan bahan bakar

Fungsi dari *burner* adalah untuk mencampur oksigen dalam bentuk udara dengan bahan bakar, sehingga bahan bakar akan terbakar dengan efisien. *Burner*

tersedia dalam berbagai variasi desain, seluruh teknik desain dimaksudkan untuk memaksimalkan efisiensi pencampuran udara dan bahan bakar. Untuk desain yang terbaru lebih ditujukan untuk meminimalisir pembentukan polutan. Beberapa burner dipasang dengan air register primer dan sekunder, seperti premix burner yang ditunjukkan pada gambar 28. Udara masuk melalui *primary air register* bercampur lebih efisien dibandingkan udara yang masuk melalui *secondary air register* pada beberapa burner. Dengan demikian kita harus memaksimalkan penggunaan udara primer. Dan kita dapat melakukannya secara bertahap dengan membuka *primary air register* sehingga nyala api mulai terangkat dari burner tip. Sisa kekurangan udara pembakaran akan disediakan melalui *secondary air register*.



Gambar 28. Skematik *premix burner* (Lieberman)

(Sumber : Kardjono, S.A., 2005)

2.6.3.5 Mengoptimalkan udara excess

Istilah optimasi excess air tidak mengacu pada operasi banyak sedikitnya jumlah oksigen. Sebagai gantinya dengan mempertimbangkan hal-hal berikut yang berkaitan dengan heater anda, anda dapat mengoptimasi excess air :

1. Meminimalisir laju bahan bakar untuk suhu keluaran heater tertentu, selanjutnya mengoperasikan pada 0.5 s.d. 1 persen oksigen lebih tinggi
2. Memaksimalkan udara primer ke dalam burner dimana burner memiliki udara primer dan sekunder.
3. Mengatur draft untuk meminimalisir kebocoran udara pada saat memaintain

tekanan negatif yang kecil pada entri bagian konveksi

4. Tutup bukaan pilot light, sight port, dan lubang-lubang lain di sekitar burner (udara pembakaran hanya bercampur dengan sempurna melalui burner air register)
5. Pada saat mengoperasikan pada penurunan laju penyalaan, matikan beberapa burner jika memungkinkan, burner akan bekerja lebih efisien jika beroperasi mendekati/pada kapasitas desainnya (jangan lupa untuk menutup air register pada burner yang tidak terpakai)
6. Minimalkan distribusi udara yang tidak merata pada firebox dengan mengatur air register pada individual burner. Aliran udara yang rendah pada satu bagian heater akan mempengaruhi kebutuhan oksigen yang lebih besar secara keseluruhan.
7. Jagalah burner tetap bersih, burner tip yang tersumbat akan menaikkan kebutuhan oksigen, lakukan pemeliharaan secara berkala untuk membersihkan burner
8. Perhatikan tampilan visual pada *firebox*

2.7 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja prototipe pembangkit uap yang dirancang adalah solar. Berikut adalah pembahasan mengenai jenis bahan bakar tersebut.

2.7.1 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 6. 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°C)	Kg/m ³	820	860	D 445 – 97
3	Viskositas (pada suhu 15°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	Kandungan Fame	% v/v	-	10	
12	Warna	No ASTM	-	1	D 1500
13	Penampilan Visual	-	Jernih dan terang		

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