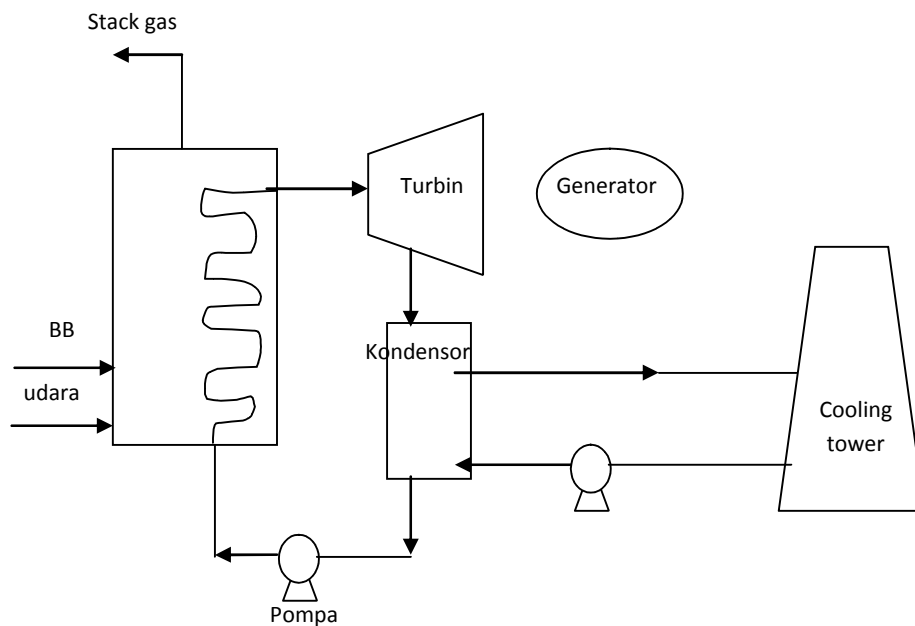


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap secara terus menerus mengubah energi yang ada didalam bahan bakar fosil (batubara, minyak bumi, gas alam) atau bahan bakar fisi (uranium, thorium) dalam bentuk poros kerja dan akhirnya menjadi energi listrik. Kinerja fluida adalah air yang sewaktu-waktu berada pada fasa cair dan sewaktu-waktu pada fasa uap selama siklus beroperasi. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sistem kerja PLTU menggunakan bahan bakar minyak residu/MFO (soalr) dan gas alam. Kelebihan dari PLTU adalah daya yang dihasilkan sangat besar. Konsumsi energi pada peralatan PLTU bersumber dari putaran turbin uap. PLTU adalah suatu pembangkit yang menggunakan uap sebagai penggerak utama (*prime mover*). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. PLTU merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang

mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan proses sudu-sudu turbin menggerakkan poros turbin, untuk selanjutnya poros turbin menggerakkan generator yang kemudian dibangkitkannya energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan akan menyuplai alat-alat yang disebut beban.

### 2.1.1 Prinsip Kerja PLTU

Prinsip kerja dari PLTU adalah dengan menggunakan siklus air-uap-air yang merupakan suatu sistem tertutup air dari kondensat atau air dari hasil proses pengondensasian di kondensor dan air *make up water* (air yang dimurnikan) dipompa oleh *condensat pump* ke pemanas tekanan rendah. Disini air dipanasi kemudian dimasukkan oleh daerator untuk menghilangkan oksigen, kemudian air ini dipompa oleh *boiler feed water pump* masuk ke *economizer*. Dari *economizer* yang selanjutnya dialirkan ke pipa untuk dipanaskan pada *tube boiler*.

Pada *tube*, air dipanasi berbentuk uap air. Uap air ini dikumpulkan kembali pada *steam drum*, kemudian dipanaskan lebih lanjut pada *superheater* sudah berubah menjadi uap kering yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi, dan selanjutnya uap ini digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, untuk sudu turbin menggerakkan poros turbin. Hasil dari putaran poros turbin kemudian memutar poros generator yang dihubungkan dengan *coupling*, dari putaran ini dihasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari generator disalurkan dan didistribusikan lebih lanjut ke pelanggan. Uap bebas dari turbin selanjutnya dikondensasikan dari kondensor dan bersama air dari *make up water pump* dipompa lagi oleh pompa kondensat masuk ke pemanas tekanan rendah, daerator, *boiler feed water pump*, pemanas tekanan tinggi, *economizer*, dan akhirnya menuju boiler untuk dipanaskan menjadi uap lagi. Proses ini akan terjadi berulang-ulang.

### 2.1.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas yang disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida bergerak. Pada *steam boiler*, ini akan menjadi reversible tekanan konstan pada proses pemanasan air untuk menjadi uap air, lalu pada turbin proses ideal akan menjadi reversible ekspansi adiabatik dari uap, pada kondenser akan menjadi reversible tekanan konstan dari panas uap kondensasi yang masih *saturated liquid* dan pada proses ideal dari pompa akan terjadi reversible kompresi adiabatik pada cairan akhir dengan mengetahui tekanannya. Ini adalah siklus reversible, yaitu keempat proses tersebut terjadi secara ideal yang biasa disebut Siklus Rankine.

Salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik adalah Boiler (Steam Generator) atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama Turbin Uap. Energi panas diperoleh dengan jalan pembakaran bahan bakar di ruang bakar.

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.

## 2.2 Boiler

Boiler merupakan mesin kalor (*thermal engineering*) yang mentransfer energi-energi kimia atau energi otomis menjadi kerja (usaha) (Muin 1988 : 28). Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan steam. Steam diperoleh dengan memanaskan bejana yang berisi air dengan bahan bakar (Yohana dan Askhabulyamin 2009: 13). Boiler mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. Boiler dirancang untuk melakukan atau memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar.

Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan (*feed water system*), sistem steam (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*). Sistem air umpan (*feed water system*) menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem steam (*steam sistem*) mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar (*fuel sistem*) adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

Boiler berfungsi sebagai pesawat konversi energi yang mengkonversikan energi kimia (potensial) dari bahan bakar menjadi energi panas. Boiler terdiri dari 2 komponen utama, yaitu:

1. Dapur sebagai alat untuk mengubah energi kimia menjadi energi panas.
2. Alat penguap (*evaporator*) yang mengubah energi pembakaran (energi panas) menjadi energi potensial uap (energi panas).

Kedua komponen tersebut dia atas telah dapat untuk memungkinkan sebuah boiler untuk berfungsi.

Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbungan (*drum*) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api

maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing (Muin 1988 : 8).

### 2.2.1 Penggunaan Boiler

Dengan sebuah boiler atau pembangkit uap energi bahan bakar dapat diubah menjadi energi uap yang dapat dimanfaatkan. Pada boiler yang menggunakan bahan bakar biasanya terjadi banyak kehilangan panas. Tidak dapat disangkal lagi bahwa monitoring secara berkala dan menjaga boiler beroperasi pada tingkat efisiensi yang optimal adalah penting sekali. Berikut ini hal yang perlu diperhatikan pada pengoperasian boiler :

#### a. Air Umpan Boiler

Dari segi pengelolaan energi, pemurnian air adalah hal yang sangat penting pada boiler. Hal ini dikarenakan padatan yang terlarut cenderung untuk mengendap pada dasar dan dinding boiler yang selanjutnya mengakibatkan turunnya efisiensi operasi boiler. Dua sumber air umpan adalah:

- Kondensat atau steam yang mengembun yang dikembalikan dari proses.
- Air makeup (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses

#### b. Tangki Air Pengisi Boiler

Merupakan bagian yang integral dari suatu instalasi boiler dan harus dapat menampung setiap kondensat tanpa kehilangan uap yang akan menurunkan beban boiler. Tangki tersebut haruslah selalu dipasang dengan suatu tutup untuk menekan kehilangan panas permukaan dan tangki dengan ukuran yang besar haruslah sepenuhnya diberi isolasi.

#### c. Pemanfaatan Kembali Panas Air Buangan

Pada beberapa instalasi, pengeluaran sebagian air boiler dilakukan secara teratur selama operasi boiler berjalan normal. Ini di maksudkan untuk membuang endapan dari boiler yang besar, untuk menjaga daya hantar boiler atau untuk membuang uap dari *autoclave* dan dari proses siklus yang lain. Air dan uap yang dibuang melalui pembuangan boiler (*blowdown*) mengandung

panas yang dapat dimanfaatkan kembali dan seharusnya bisa digunakan untuk pemanasan pendahuluan air umpan boiler (*feed water*) atau air untuk proses dengan menggunakan penukar panas (*heat exchanger*)

d. Tekanan Operasi

Pada setiap sistem uap, tekanan menentukan suhu dan suhu menentukan panas yang hilang dari sistem. Disamping itu bila uap bertekanan tinggi digunakan untuk proses bertekanan rendah, timbul panas lanjut (*superheat*) yang mungkin tidak diinginkan untuk proses tersebut. Berdasarkan hal-hal tersebut diatas, maka boiler tidak boleh dioperasikan pada tekanan yang jauh lebih besar dari tekanan tertinggi proses. Dan tekanan proses haruslah tidak melebihi besarnya tekanan yang diperlukan untuk melaksanakan proses tersebut. Dalam beberapa hal mungkin lebih baik bila dipergunakan beberapa boiler yang dapat dioperasikan sendiri-sendiri atau paralel bersamaan, manakala proses-proses yang dilaksanakan memerlukan berbagai tekanan yang amat berbeda.

e. Panas Hilang Awal Operasi

Untuk suatu operasi, ada boiler yang berukuran besar dan ada juga yang berukuran kecil. perbedaan ukuran terletak pada banyaknya air yang disimpan didalam drum boiler. Boiler bahan bakar umumnya berukuran besar karena membutuhkan permukaan luas yang kontak dengan nyala api. Boiler listrik, sebaliknya cenderung berukuran kecil karena elemen pemanasnya bentuknya sangat kompak dan membutuhkan hanya sedikit air untuk bisa tercelup total.

Keuntungan boiler berukuran besar ialah kapasitasnya besar untuk menghasilkan uap dengan sedikit penurunan tekanan (*flash off steam*), dan karenanya cocok untuk penyediaan kebutuhan besar yang tiba-tiba. Dalam beberapa macam pemakaian, hal ini merupakan suatu karakteristik yang menguntungkan, namun ketel uap ini juga mempunyai kelemahan, karena ketel uap ini membutuhkan waktu dan energi yang banyak untuk mencapai tekanan operasi sejak mulai dipanaskan.

Untuk sistem kerja yang menggunakan satu atau dua gilir tenaga kerja, energi yang dibutuhkan untuk *star up* umumnya dianggap sebagai panas yang

hilang, karena pada malam hari panas ini biasanya hilang begitu saja. Waktu yang dibutuhkan untuk *star up* berkisar antara 5 menit sampai 2 jam.

f. Penyimpanan Uap

Suatu alternatif yang lebih baik yang sering diterapkan pengganti boiler besar ialah pemasangan suatu boiler yang lebih kecil yang dihubungkan dengan suatu penyimpanan uap. Meskipun cara ini mengakibatkan naiknya total untuk biaya instalasi tersebut, tetapi cara ini mempunyai kombinasi keuntungan dari waktu *star up* yang cepat dan kesiapan tersedianya panas setiap uap diperlukan.

g. Panas Hilang Boiler Uap Saat Tanpa Beban

Merupakan hal yang biasa bahwa boiler dibiarkan beroperasi untuk waktu yang lama tanpa adanya beban yang berarti. Selama waktu ini terjadi panas hilang yang cukup banyak. Sebagai contoh misalnya pada pembersihan kering pabrik dimana boiler dioperasikan sepanjang hari untuk jam operasi ternyata yang terpakai hanya dua atau tiga jam saja.

Dengan jadwal kerja yang terencana, bisa saja pemakaian uap dibatasi untuk beberapa jam yang perlu saja dan selanjutnya boiler bisa dimatikan. Bahkan waktu istirahat makan siang, adalah lebih ekonomis bila katup boiler ditutup dan pemanas boiler dimatikan saja. Pemasangan boiler tepat di tempat-tempat proses, mempermudah cara mematikan boiler tersebut apabila proses yang berkenaan tidak lagi memerlukan uap.

h. Efisiensi Pembakaran dan Kelebihan Udara

Pada boiler listrik, semua energi yang disuplay diteruskan ke air, tetapi pada ketel uap bahan bakar 20% atau lebih dari energi yang diberikan bahan bakar terbuang melalui gas buang boiler (*flue gas*). Sayangnya, gas buang ini merupakan suatu ketentuan dasar tercapainya pembakaran yang baik. Umumnya diperlukan suplay udara yang berlebih, sekitar 10% untuk gas, 20% untuk bahan bakar minyak dan 40% bahan bakar padat guna mencapai pembakaran bahan bakar yang komplit. Dan hal ini diukur sebagai persentase CO<sub>2</sub> didalam gas buang. Efisiensi maksimum harus dicapai dengan suhu

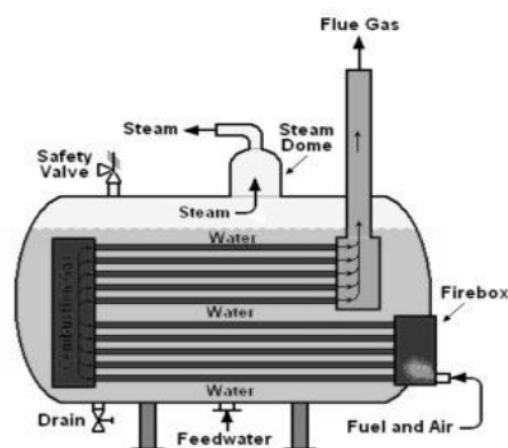
minimum gas buang sekitar 200 – 250 °C, suhu yang selalu diatas titik embun, guna mengurangi terjadinya korosi.

### 2.2.2 Jenis-Jenis Boiler

Bagian ini menerangkan tentang berbagai jenis boiler: Fire tube boiler, Water tube boiler, Paket boiler, Fluidized bed combustion boiler, Atmospheric fluidized bed combustion boiler, Pressurized fluidized bed combustion boiler, Circulating fluidized bed combustion boiler, Stoker fired boiler, Pulverized fuel boiler, Boiler pemanas limbah (Waste heat boiler) dan Pemanas fluida termis.

#### 1. *Fire Tube Boiler (Boiler Pipa Api)*

Pada fire tube boiler, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk dirubah menjadi steam. Fire tube boilers biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, fire tube boilers kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. Fire tube boilers dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, 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 2. *Fire Tube Boiler (Boiler Pipa Api)*

Sumber : [Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/](http://Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/)



Boiler jenis ini pada bagian tubenya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu shell dialiri air yang akan diuapkan. Tube-tubanya langsung didinginkan oleh air yang melindunginya. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan horizontal dari gas pembakaran diantara furnace dan pipa-pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama. Boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Raharjo dan Karnowo 2008: 180).

Konstruksi boiler pipa api terdiri dari sebuah silinder atau tangki berisi air dimana didalam tangki tersebut terdapat susunan *tube* yang dialiri oleh gas asap. Pipa *tube* ini merupakan pengembangan ketel uap lorong api dengan pengembangan sebagai berikut :

- Volume kecil (isi air ketel)
- Luas bidang pemanas dapat diusahakan lebih besar
- Ruang aliran gas asap dapat diusahakan lebih besar sehingga aliran gas asap tidak cepat keluar dari ketel uap.

Dalam perancangan boiler ada beberapa faktor penting yang harus dipertimbangkan agar boiler yang direncanakan dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang kebutuhan. Faktor yang mendasari pemilihan jenis boiler adalah sebagai berikut:

- a. Kapasitas yang digunakan.
- b. Kondisi uap yang dibutuhkan.
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan.
- d. Konstruksi yang sederhana.

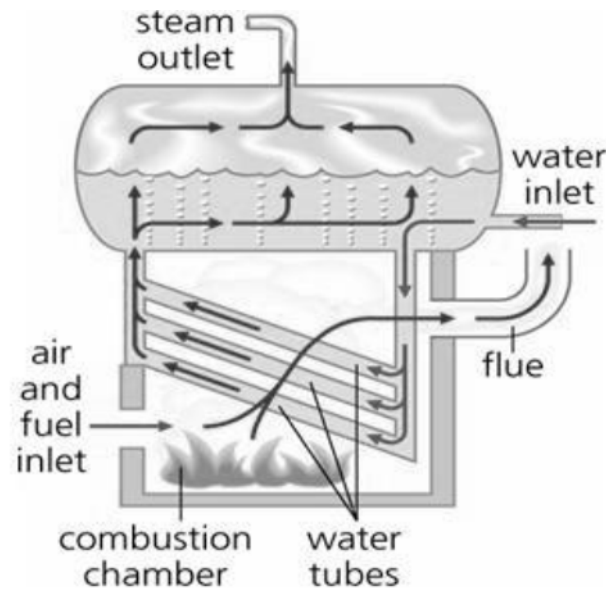
## 2. *Water Tube Boiler (Boiler Pipa Air)*

Pada water tube boiler, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. 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.

Untuk water tube yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik water tube boilers sebagai berikut :

- a. *Forced, induced* dan *balanced draft* membantu untuk meningkatkan efisiensi pembakaran.
- b. Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari plant pengolahan air.
- c. Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi



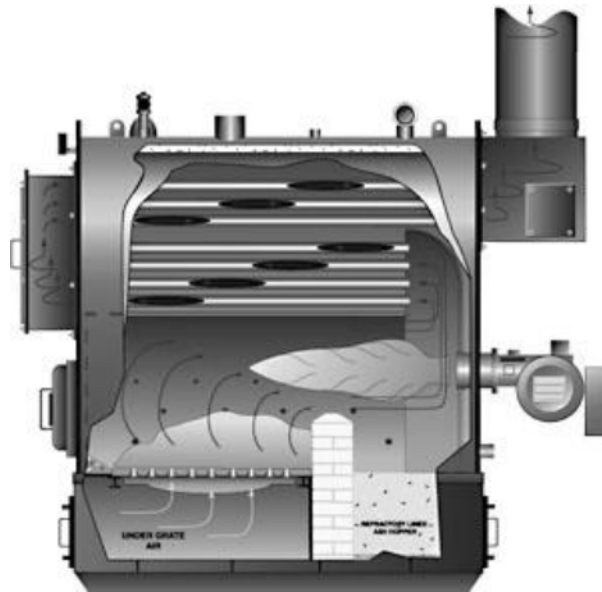
Gambar 3. *Water Tube Boiler* (Boiler Pipa Air)

Sumber : [Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/](http://Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/)

### 3. *Packaged Boiler* (Paket Boiler)

Disebut boiler paket sebab sudah tersedia sebagai paket yang lengkap. Pada saat dikirim ke pabrik, hanya memerlukan pipa steam, pipa air, suplai bahan bakar dan sambungan listrik untuk dapat beroperasi. Paket boiler biasanya merupakan tipe shell and tube dengan rancangan fire tube dengan transfer panas baik radiasi maupun konveksi yang tinggi. Ciri-ciri dari Paket Boiler adalah :

- 1) Kecilnya ruang pembakaran dan tingginya panas yang dilepas menghasilkan penguapan yang lebih cepat
- 2) Banyaknya jumlah pipa yang berdiameter kecil membuatnya memiliki perpindahan panas konveksi yang baik
- 3) Sistem forced atau induced draft menghasilkan efisiensi pembakaran yang baik
- 4) Sejumlah lintasan/pass menghasilkan perpindahan panas keseluruhan yang lebih baik.
- 5) Tingkat efisiensi termisnya yang lebih tinggi dibandingkan dengan boiler lainnya.



Gambar 4. *Packaged Boiler* (Paket Boiler)

Sumber : [Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/](http://Akademia.edu.ac.id/tipe-boiler/)

Boiler tersebut dikelompokkan berdasarkan jumlah pass nya yaitu berapa kali gas pembakaran melintasi boiler. Ruang pembakaran ditempatkan sebagai lintasan pertama setelah itu kemudian satu, dua, atau tiga set pipa api. Boiler yang paling umum dalam kelas ini adalah unit tiga pass/lintasan dengan dua set fire-tube/ pipa api dan gas buangnya keluar dari belakang boiler.

### 2.2.3 Proses Kerja Boiler

Energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem boiler memiliki nilai tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan steam yang akan digunakan. Berdasarkan ketiga hal tersebut sistem boiler mengenal keadaan tekanan-temperatur rendah (low pressure/LP), dan tekanan-temperatur tinggi (high pressure/HP), dengan perbedaan itu pemanfaatan steam yang keluar dari sistem boiler dimanfaatkan dalam suatu proses untuk memanaskan cairan dan menjalankan suatu mesin (commercial and industrial boilers), atau membangkitkan energi listrik dengan merubah energi kalor menjadi energi mekanik kemudian memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik (power boilers). Namun, ada juga yang menggabungkan kedua sistem boiler tersebut, yang memanfaatkan tekanan-temperatur tinggi untuk membangkitkan energi listrik, kemudian sisa steam dari turbin dengan keadaan tekanan-temperatur rendah dapat dimanfaatkan ke dalam proses industri dengan bantuan heat recovery boiler.

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 dari sistem air umpan, penanganan air umpan diperlukan sebagai bentuk pemeliharaan untuk mencegah terjadi kerusakan dari sistem steam. 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. Berikut komponen-komponen boiler:

a. Furnace

Komponen ini merupakan tempat pembakaran bahan bakar. Beberapa bagian dari furnace diantaranya : refractory, ruang perapian, burner, exhaust for flue gas, charge and discharge door.

b. Steam Drum

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

c. Superheater

Komponen ini merupakan tempat pengeringan steam dan siap dikirim melalui main steam pipe dan siap untuk menggerakkan turbin uap atau menjalankan proses industri.

d. Air Heater

Komponen ini merupakan ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan udara luar yang diserap untuk meminimalisasi udara yang lembab yang akan masuk ke dalam tungku pembakaran.

e. Economizer

Komponen ini merupakan ruangan pemanas yang digunakan untuk memanaskan air dari air yang terkondensasi dari sistem sebelumnya maupun air umpan baru.

f. Safety valve

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

g. Blowdown valve

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

#### **2.2.4 Kondisi Air Umpan Boiler**

Air yang digunakan pada proses pengolahan dan air umpan boiler diperoleh dari air sungai, air waduk, sumur bor dan sumber mata air lainnya. Kualitas air tersebut tidak sama walaupun menggunakan sumber air sejenis, hal ini dipengaruhi oleh lingkungan asal air tersebut. Sumber mata air sungai umumnya sudah mengalami pencemaran oleh aktivitas penduduk dan kegiatan industri, oleh sebab itu perlu dilakukan pemurnian.

Air umpan boiler harus memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan agar tidak menimbulkan masalah-masalah pada pengoperasian boiler. Air tersebut

harus bebas dari mineral-mineral yang tidak diinginkan serta pengotor-pengotor lainnya yang dapat menurunkan efisiensi kerja dari boiler.

### **2.2.5 Masalah-Masalah pada Boiler**

Suatu boiler atau pembangkit uap yang dioperasikan tanpa kondisi air yang baik, cepat atau lambat akan menimbulkan masalah-masalah yang berkaitan dengan kinerja dan kualitas dari sistem pembangkit uap. Banyak masalah-masalah yang ditimbulkan akibat dari kurangnya penanganan dan perhatian khusus terhadap penggunaan air umpan boiler.

Akibat dari kurangnya penanganan terhadap air umpan boiler akan menimbulkan masalah-masalah sebagai berikut :

#### **a) Pembentukan kerak**

Terbentuk kerak pada dinding boiler terjadi akibat adanya mineral-mineral pembentukan kerak, misalnya ion-ion kesadahan seperti  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$  dan akibat pengaruh gas penguapan. Diamping itu pula dapat disebabkan oleh mekanisme pemekatan didalam boiler karena adanya pemanasan. Jenis-jenis kerak yang umum dalam boiler adalah kalsium sulfat, senyawa silikat dan karbonat. Zat-zat dapat membentuk kerak yang keras dan padat sehingga bila lama penanganannya akan sulit sekali untuk dihilangkan. Silika diendapkan bersama dengan kalsium dan magnesium sehingga membuat kerak semakin keras dan semakin sulit untuk dihilangkan.

Kerak yang menyelimuti permukaan boiler berpengaruh terhadap perpindahan panas permukaan dan menunjukkan dua akibat utama yaitu berkurangnya panas yang dipindahkan dari dapur ke air yang mengakibatkan meningkatkan temperatur disekitar dapur, dan menurunnya efisiensi boiler.

Untuk mengurangi terjadinya pembentukan kerak pada boiler dapat dilakukan pencegahan-pencegahan sebagai berikut :

- Mengurangi jumlah mineral dengan unit softener
- Melakukan blowdown secara teratur jumlahnya
- Memberikan bahan kimia anti kerak

Zat terlarut dan tersuspensi yang terdapat pada semua air alami dapat dihilangkan/dikurangi pada proses pra-treatment (pengolahan awal) yang terbukti ekonomis. Penanggulangan kerak yang sudah ada dapat dilakukan dengan cara :

- a. *On-line cleaning* yaitu pelunakan kerak-kerak lama dengan bahan kimia selama Boiler beroperasi normal.
- b. *Off-line cleaning (acid cleaning)* yaitu melarutkan kerak-kerak lama dengan asam-asam khusus tetapi Boiler harus berhenti beroperasi.
- c. *Mechanical cleaning* : dengan sikat, pahat, scrub, dan lain-lain.

b) Peristiwa korosi

Korosi dapat disebabkan oleh oksigen dan karbon dioksida yang terdapat dalam uap yang terkondensasi. Korosi merupakan peristiwa logam kembali kebentuk asalnya dalam misalnya besi menjadi oksida besi, aluminium dan lain-lain. Peristiwa korosi dapat terjadi disebabkan oleh :

- Gas-gas yang bersifat korosif seperti  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$
- Kerak dan deposit
- Perbedaan logam (korosi galvanis)
- pH yang terlalu rendah dan lain-lain

Jenis korosi yang dijumpai pada boiler dan sistem uap adalah general corrosion, pitting (terbentuknya lubang) dan embrittlement (peretakan baja). Adanya gas yang terlarut, oksigen dan karbon dioksida pada air umpan boiler adalah penyebab utama *general corrosion* dan *pitting corrosion* (tipe oksigen elektro kimia dan diffensial). Kelarutan gas-gas ini di dalam air umpan boiler menurun jika suhu naik. Kebanyakan oksigen akan memisah pada ruang uap, tetapi sejumlah kecil residu akan tertinggal dalam larutan atau terperangkap pada kantong-kantong atau dibawah deposit, hal ini dapat menyebabkan korosi pada logam-logam boiler. Karena itu penting untuk melakukan proses deoksigenasi air boiler.

Jumlah rata-rata korosi atau serangan elektrokimia akan naik jika nilai pH air menurun. Selain itu air umpan boiler akan dikondisikan secara kimia

mencapai nilai pH yang relatif tinggi. Untuk mengurangi terjadinya peristiwa korosi dapat dilakukan pencegahan sebagai berikut:

- Mengurangi gas-gas yang bersifat korosif
- Mencegah terbentuknya kerak dan deposit dalam boiler
- Mencegah korosi galvanis
- Menggunakan zat yang dapat menghambat peristiwa korosif
- Mengatur pH dan alkalinitas air boiler dan lain-lain

c) Pembentukan deposit

Deposit merupakan peristiwa penggumpalan zat dalam air umpan boiler yang disebabkan oleh adanya zat padat tersuspensi misalnya oksida besi, oksida tembaga dan lain-lain. Peristiwa ini dapat juga disebabkan oleh kontaminasi uap dari produk hasil proses produksi. Sumber deposit didalam air seperti garam-garam yang terlarut dan zat-zat yang tersuspensi didalam air umpan boiler. Pemanasan dan dengan adanya zat tersuspensi dalam air pada boiler menyebabkan mengendapnya sejumlah muatan yang menurunkan daya kelarutan, jika temperaturnya dinaikkan. Hal ini menjelaskan mengapa kerak dan sludge (lumpur) terbentuk. Kerak merupakan bentuk deposit-deposit yang tetap berada pada permukaan boiler sedangkan sludge merupakan bentuk deposit-deposit yang tidak menetap atau deposit lunak.

Pada ketel bertekanan tinggi, silika muda mengendap dengan uap dan dapat membentuk deposit yang menyulitkan pada daun turbin. Pencegahan-pencegahan yang dapat dilakukan untuk mengurangi terjadinya peristiwa deposit dapat dilakukan diantaranya :

- a. Meminimalisasi masuknya mineral-mineral yang dapat menyebabkan deposit seperti oksida besi, oksida tembaga dan lain – lain.
- b. Mencegah korosi pada sistem kondensat dengan proses netralisasi (mengatur pH 8,2–9,2) dapat juga dilakukan dengan mencegah terjadinya kebocoran udara pada sistem kondensat.
- c. Mencegah kontaminasi uap selanjutnya menggunakan bahan kimia untuk mendispersikan mineral-mineral penyebab deposit.



- d. Penanggulangan terjadinya deposit yang telah ada dapat dilakukan dengan *acid cleaning*, *online cleaning*, dan *mechanical cleaning*.

d) Kontaminasi Uap (steam carryover)

Ketika air boiler mengandung garam terlarut dan zat tersuspensi dengan konsentrasi yang tinggi, ada kecendrungan baginya untuk membentuk busa secara berlebihan sehingga dapat menyebabkan steam carryover zat-zat padat dan cairan pengotor kedalam uap.

Steam carryover terjadi jika mineral-mineral dari boiler ikut keluar bersama dengan uap ke alat-alat seperti superheater, turbin, dan lain-lain. Kontaminasi-kontaminasi ini dapat diendapkan kembali pada sistem uap atau zat-zat itu akan mengontaminasi proses atau material-material yang diperlukan steam.

Steam carryover dapat dihindari dengan menahan zat-zat padat terlarut pada air boiler dibawah tingkat tertentu melalui suatu analisa sistematis dan kontrol pada pemberian zat-zat kimia dan blowdown. Carryover karbon dioksida dapat mengembalikan uap dan asam-asam terkondensasi

### **2.3 Furnace**

*Furnace* adalah suatu ruangan yang digunakan sebagai tempat pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan kalr dan kemudian kalor digunakan untuk memanaskan bahan baku (Anonim, 2011).

*Furnace* secara luas dibagi menjadi dua jenis berdasarkan metoda pembangkitan panasnya, yaitu *furnace* yang menggunakan bahan bakar dan *furnace* yang menggunakan listrik. *Furnace* pembakaran dapat digolongkan menjadi beberapa bagian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, yaitu jenis bahan bakar yang digunakan, cara pengisian bahan bakar, dan cara perpindahan panasnya serta cara pemanfaatan kembali limbahnya.

Idealnya, *furnace* harus memanaskan bahan sebanyak mungkin sampai mencapai suhu yang seragam dengan bahan bakar. Kunci dari operasi *furncae* yang efisien yaitu terletak pada pembakaran bahan bakar yang sempurna dengan udara berlebih yang minim. *Furnace* beroperasi dengan efesiensi yang relatif

rendah (paling rendah 7 %) dibandingkan dengan peralatan pembakaran lainnya seperti boiler (dengan efisiensi lebih dari 90%). Hal ini disebabkan oleh suhu operasi yang tinggi dalam *furnace*. Klasifikasi dari *furnace* berdasarkan jenis bahan bakar yang digunakan, cara pengisian bahan bakar, cara perpindahan panas, dan cara pemanfaatan limbah panas dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi *Furnace*

<b>Metode Klasifikasi</b>	<b>Jenis dan Contoh</b>
Jenis bahan bakar yang digunakan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dibakar dengan minyak</li> <li>- Dibakar dengan gas</li> <li>- Dibakar dengan batubara</li> </ul>
Cara pengisian bahan bakar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berselang/<i>Batch</i></li> <li>- Berkala</li> <li>- Kontinyu</li> </ul>
Cara perpindahan panas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Radiasi (tempat perapian terbuka)</li> <li>- Konveksi (pemanasan melalui media)</li> </ul>
Cara pemanfaatan kembali limbah	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Rekuperatif</i></li> <li>- <i>Regeneratif</i></li> </ul>

*Sumber : energyefecienciasia.org*

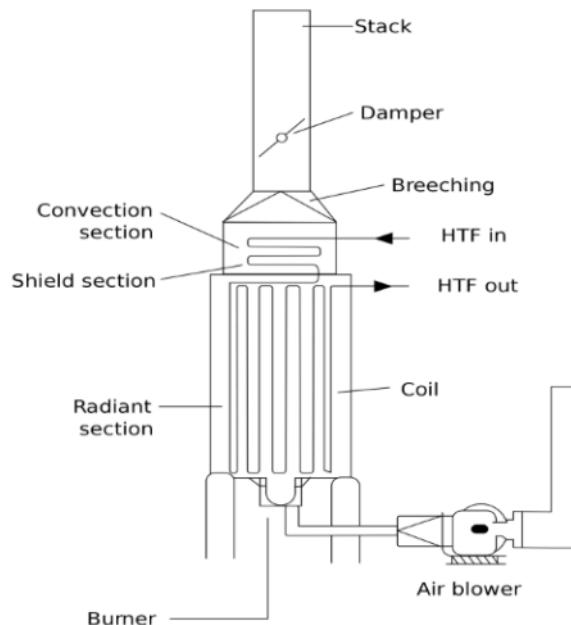
### 2.3.1 Jenis-Jenis *Furnace*

*Furnace* adalah suatu alat perpindahan panas yang sumber panasnya dihasilkan dari reaksi pembakaran bahan bakar. Berdasarkan bentuknya, *furnace* dibagi menjadi tiga jenis yaitu :

#### 1. *Furnace* Silinder Vertikal

Tipe ini berbentuk silinder tegak, tube pada daerah radiasi dipasang secara vertikal. Tube yang satu dengan yang lainnya disambung dengan menggunakan U bend. *Burner* terletak pada bagian bawah, sehingga nyala api sejajar dengan tube dapur. Bentuk lantai adalah lingkaran, sedang *burner* dipasang di lantai dengan arah pancaran api vertikal. Tube di runag pembakaran dipasang vertikal. *Furnace* jenis ini bisa didesain tanpa atau dengan ruang konveksi. Jenis tube yang dipasang di ruang konveksi bisa *bare tube*, *finned tube*, tetapi pada umumnya digunakan *finned tube* untuk

mempercepat proses perpindahan panas karena konveksi. *Furnace* tipe silinder dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Furnace Tipe Silinder Vertikal

Sumber : [Scribd.com/jenis-jenis-furnace/](https://www.scribd.com/jenis-jenis-furnace/)

## 2. *Furnace* Tipe Box

Mempunyai bentuk kotak atau box, daerah radiasi dan konveksi dipisahkan oleh *great wall*. Dapur ini digunakan untuk kapasitas besar (lebih dari 100 Mbtu/jam). Tube-tube dapur dipasang pada bagian atas, lantai dan sisi dari bridge dapur, burner dipasang secara horizontal pada dinding *furnace*. Pada *heater* jenis ini antara ruang pembakaran dengan ruang konveksi dipisahkan oleh satu atau lebih dinding penyekat yang dinamakan *Bridge Wall*. Burner dipasang pada dinding dengan arah pancaran api mendatar. Semua tube dipasang pada arah mendatar. Box heater sudah jarang dipakai karena harganya mahal. *Furnace* tipe box dapat dilihat pada Gambar 6.

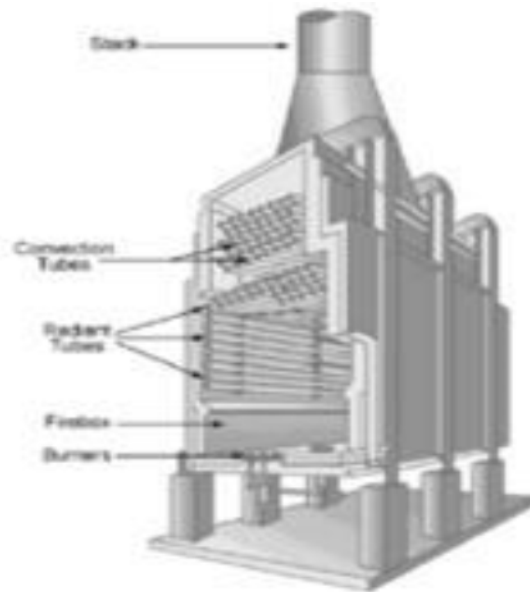


Gambar 6. Furnace Tipe Box

*Sumber : Scribd.com/jenis-jenis-furnace/*

### 3. *Furnace Tipe Kabin*

Tipe kabin ini mempunyai kamar terdiri dari daerah radiasi dan konveksi. Tube-tube dipasang secara horizontal sedangkan burner terletak pada lantai furnace, sehingga nyala api tidak lurus dan sejajar dengan dinding dapur. Susunan tube di ruang pembakaran dibuat dekat dengan dinding atau dekat dengan penyekat dengan arah mendatar. Ruang konveksi terletak di atas ruang pembakaran. Dua lapis pertama tube di ruang konveksi yang langsung menghadap ke ruang pembakaran dinamakan *Shield Tube*. Burner dipasang di lantai heater sedang pancaran api diarahkan vertikal. Sering dijumpai heater jenis ini mempunyai dinding penyekat dibagian tengahnya. Berikut adalah gambar Furnace Tipe Kabin :



Gambar 7. Furnace Tipe Kabin

Sumber : [Scribd.com/jenis-jenis-furnace/](https://www.scribd.com/jenis-jenis-furnace/)

### 2.3.2 Bagian-Bagian Furnace

Furnace terdiri dari beberapa bagian utama yaitu :

#### 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 8 ditransfer secara konveksi antara udara dan bahan baker 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 merecovery 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.

#### **2.3.3 Efisiensi Panas Furnace**

Panas yang hilang melalui dinding furnace, bergantung pada susunan material dinding isolasi (refractory) dan ketebalannya. Bagaimanapun juga perlu ada pertimbangan dari sisi ekonomi antara ketebalan optimum isolasi dengan panas yang hilang. Panas yang hilang lebih besar pada furnace yang kecil, rasio antara dinding shell dengan volume bagian radiasi menurun dengan kenaikan. Besar kecilnya panas yang hilang bergantung pada udara panas yang dikeluarkan lewat stack. Laju alir flue gas meningkat dengan bertambahnya udara excess, oleh karena itu, furnace sebaiknya dioperasikan dengan udara excess yang memadai.

Excess udara yang terlalu kecil akan menyebabkan losses bahan bakar karena adanya sejumlah bahan bakar yang tidak terbakar. Losses bahan bakar ini kemungkinan bisa lebih besar daripada efisiensi yang diperoleh karena mengurangi udara excess. Karena itu perlu diupayakan untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna tanpa adanya bahan bakar yang tidak terbakar. Suhu flue gas merupakan faktor utama penyebab kehilangan panas. Untuk itu perlu diupayakan mendinginkan suhu flue gas, dengan merecovery panas sisa melalui suatu proses perpindahan panas. Untuk mendinginkan flue gas, harus ada fluida dingin yang 10 dikontakkan (dipanaskan). Dengan proses ini suhu flue gas yang

terlalu tinggi dapat diturunkan, yang sering disebut dengan efisiensi panas. Beberapa cara untuk melakukan efisiensi panas :

- a. Produksi steam : produksi steam tidak mengurangi konsumsi bahan bakar, justru akan menguntungkan, seandainya steam bisa dimanfaatkan
- b. Merecycle panas flue gas untuk pemanas awal udara pembakaran : pada saat flue gas keluar dari bagian konveksi dapat didinginkan melalui alat perpindahan panas, dimana udara yang digunakan untuk pembakaran dilewatkan di dalamnya. Proses ini memerlukan blower udara. Salah satu masalah pada pendinginan flue gas adalah korosi yang disebabkan kondensasi asam sulfat. Hal ini tergantung dari banyak sedikitnya kandungan sulfur dalam bahan bakar.

#### **2.4 Proses Pembakaran**

Pengertian pembakaran secara umum yaitu terjadinya oksidasi cepat dari bahan bakar disertai dengan produksi panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah karbon, hidrogen, dan sulfur.

Tujuan dari pembakaran yang sempurna adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “Tiga T” yaitu :

- a. T-Temperatur

Temperatur yang digunakan dalam pembakaran yang baik harus cukup tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia

- b. T-Turbulensi

Turbulensi yang tinggi menyebabkan terjadinya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan pengoksidasi

- c. T-Time (Waktu)

Waktu yang cukup agar *input* panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia

Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan tingkat konsumsi bahan bakar ekonomis dan berkurangnya besar kepekatan asap hitam gas buang karena

pada pembakaran sempurna campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar seluruhnya dalam waktu dan kondisi yang tepat. Agar terjadi pembakaran yang sempurna maka perlu diperhatikan kualitas bahan bakar sesuai dengan karakteristiknya sehingga homogenitas campuran bahan bakar dengan udara dapat terjadi secara sempurna. Viskositas bahan bakar adalah salah satu karakteristik bahan bakar yang sangat menentukan kesempurnaan proses pembakaran. Viskositas yang tinggi menyebabkan aliran solar terlalu lambat. Tingginya viskositas menyebabkan beban pada pompa injeksi menjadi lebih besar dan pengkabutan saat injeksi kurang sempurna sehingga bahan bakar sulit terbakar.

Energi panas yang dihasilkan dari suatu proses pembakaran senyawa hidrokarbon merupakan kebutuhan energi yang paling dominan dalam refinery. Oleh karena itu pengelolaan energi yang tepat dan efisien merupakan langkah penting dalam upaya penghematan biaya produksi secara menyeluruh. Pembakaran merupakan reaksi kimia yang bersifat eksotermis dari unsur-unsur yang ada di dalam bahan bakar dengan oksigen serta menghasilkan panas. Proses pembakaran memerlukan udara, namun jumlah udara yang dibutuhkan tidak diberikan dalam jumlah yang tepat secara stoikiometri, namun dlebihihkan. Hal ini bertujuan supaya pembakaran berlangsung sempurna. Kelebihan udara ini disebut Excess air (udara yang berlebih).

Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan jumlah panas yang maksimum. Pembakaran dinyatakan secara kualitatif atau kuantitatif dengan reaksi kimia. Jumlah panas yang dihasilkan bahan bakar dinyatakan sebagai nilai kalori pembakaran (Calorific Value). Reaksi kimia terjadi melalui suatu proses oksidasi senyawa-senyawa karbon, hidrogen dan sulfur yang ada dalam bahan bakar. Reaksi ini umumnya menghasilkan nyala api. Terdapat dua istilah pembakaran yang berhubungan dengan udara excess, yaitu :

(1) Neutral combustion,

Merupakan pembakaran tanpa excess atau defisit udara dan tanpa bahan bakar yang tidak terbakar,

(2) Oxidizing combustion,



Merupakan pembakaran dengan excess udara. Udara yang berlebih bukan merupakan jaminan pembakaran yang sempurna

#### 2.4.1 Kebutuhan Udara Pembakaran

Dalam suatu proses pembakaran bahan bakar dengan oksigen, dibutuhkan oksigen murni untuk proses pembakaran didalam ruang bakar. Namun hal ini merupakan hal yang tidak efisien karena harga oksigen murni yang sangat mahal, selain itu dapat mengakibatkan suhu lokal yang sangat tinggi di dalam ruang bakar sehingga dapat merusak pipa-pipa dan logam pembungkus boiler. Namun hal ini dapat diatasi dengan menggunakan oksigen yang cukup banyak tersedia yaitu udara. Jika mengabaikan kandungan kecil dari gas-gas mulia yang ada di dalam udara seperti neon, xenon, dan sebagainya, maka dapat menganggap udara kering sebagai campuran dari gas nitrogen dan oksigen.

Proporsi oksigen dan nitrogen dapat diatur dalam udara, dalam satuan volume maupun satuan berat. Dalam bentuk persentase, proporsinya adalah :

Berdasarkan berat : Oksigen = 23,2 %  
Nitrogen = 76,8 %

Berdasarkan volume : Oksigen 21 %  
Nitrogen = 79 %

#### 2.4.2 Kebutuhan Udara Teoritis

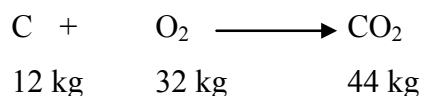
Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara :

- a. Berdasarkan pada satuan berat
- b. 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.

##### a. 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.

b. 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)

### 2.4.3 Udara Berlebih (*Excess Air*)

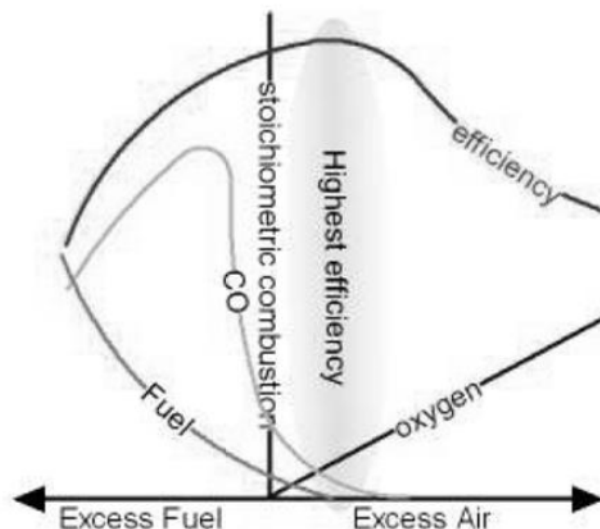
Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan O<sub>2</sub> yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari :

- a. Komposisi gas buang yang meliputi N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> dan CO
- b. Pengukuran secara langsung udara yang disuplai

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{O}_2 \text{ di gas buang} - \text{O}_2 \text{ teoritis}}{\text{O}_2 \text{ teoritis}} \times 100 \% \text{ (Himmelblau, 1991)}$$

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 8.



Gambar 8. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran dengan Udara Berlebih

(Sumber : Totok Gunawan, 2010)

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)

#### 2.4.4 Emisi Gas Buang

Polusi udara oleh gas buang merupakan gangguan terhadap lingkungan. Komponen-komponen gas buang yang membahayakan itu antara lain adalah asap hitam (angus), hidrokarbon yang tidak terbakar, karbon monoksida (CO), oksida nitrogen (NO), dan NO<sub>2</sub>. NO dan NO<sub>2</sub> biasa dinyatakan dengan NO<sub>x</sub> (Arismunandar, 2002 : 51). Namun jika dibandingkan dengan bensin, solar lebih banyak mengandung CO. Disamping itu kadar NO<sub>2</sub> sangat rendah jika dibandingkan dengan NO. Jadi boleh dikatakan bahwa komponen utama gas buang dari bahan bakar solar yang membahayakan adalah NO dan asap hitam.

Selain dari komponen tersebut diatas beberapa hal berikut yang merupakan bahaya atau gangguan meskipun bersifat sementara. Asap putih yang terdiri atas kabut bahan bakar atau minyak pelumas yang terbentuk pada start dingin, asap biru terjadi karena adanya bahan bakar yang tidak terbakar atau tidak terbakar sempurna terutama periode pemanasan, serta bau yang kurang sedap merupakan bahaya yang mengganggu lingkungan. Selanjutnya bahan bakar dengan kadar belerang yang tinggi sebaiknya tidak digunakan karena akan menyebabkan adanya  $\text{SO}_2$  didalam gas buang.

Asap hitam membahayakan lingkungan karena mengeruhkan udara sehingga mengganggu pandangan, tetapi juga karena adanya kemungkinan mengandung karsinogen. Proses pembakaran mengeluarkan asap hitam yang sekalipun mengandung partikel karbon yang tidak terbakar tetapi buka karbon monoksida (CO). Jika angus terjadi terlalu banyak, gas buang yang keluar dari ruang bakar akan berwarna hitam dan mengotori udara.

Menurut Nakoela Soenarta (1995 : 39) faktor-faktor yang menyebabkan terbentuknya jelaga atau angus pada gas buang ruang bakar adalah :

- a. Konsentrasi oksigen sebagai gas pembakar yang kurang
- b. Bahan bakar yang disemprotkan ke dalam ruang bakar terlalu banyak
- c. Suhu di dalam ruang bakar terlalu tinggi.
- d. Penguapan dan pencampuran bahan bakar dan udara yang ada di dalam silinder tidak berlangsung sempurna
- e. Karbon tidak mempunyai cukup waktu untuk berdifusi supaya bergabung dengan oksigen

Pemanasan untuk menaikkan suhu bahan bakar adalah salah satu cara untuk mengubah karakteristik suatu bahan bakar. Pemanasan pada solar mengakibatkan turunnya viskositas dan bertambahnya volume yang menyebabkan butir-butir bahan bakar akan lebih mudah menguap dan mempengaruhi proses pengkabutan saat penyemprotan. Butiran bahan bakar yang disemprotkan sangat berpengaruh terhadap proses pembakaran sehingga tekanan penyemprotan divariasikan untuk mempercepat dan memperbaiki proses pencampuran bahan bakar dengan udara. Langkah ini dilakukan dengan tujuan untuk dapat diperoleh

homogenesis campuran yang lebih sempurna sehingga pembakaran yang sempurna dapat tercapai. Dengan langkah ini diharapkan besar konsumsi bahan bakar dan kepekatan asap hitam gas buang dapat dikurangi.

## 2.5 Karakteristik Bahan Bakar

Syarat-syarat bahan bakar yang baik sebagai berikut :

- Mempunyai titik nyala yang rendah, sehingga mudah terbakar
- Mempunyai nilai kalori yang tinggi
- Tidak menghasilkan gas buang yang beracun dan membahayakan
- Asap yang dihasilkan sedikit, tidak banyak membentuk jelaga
- Ekonomis, mudah dalam penyimpanan dan pengangkutan
- Mempunyai efisiensi yang tinggi

Nilai kalori bahan bakar merupakan karakteristik utama bahan bakar, nilai kalori atau heating value bahan bakar padat, cair atau gas dapat dinyatakan sebagai jumlah panas yang dihasilkan dari pembakaran yang sempurna setiap satuan massa bahan bakar. Nilai kalori bahan bakar padat dan cair dinyatakan dalam satuan Kcal/kg atau Btu/lb bahan bakar. Nilai kalori bahan bakar gas dinyatakan dalam Btu/Cuft atau Kcal/m<sup>3</sup> pada temperatur dan tekanan tertentu. Terdapat dua istilah nilai kalori bahan bakar yaitu :

### 1. Higher Heating Value (HHV) atau Gross Heating Value.

Higher Heating Value adalah jumlah panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar tiap satuan massa bahan bakar jika hasil pembakarannya didinginkan sampai suhu kamar (H<sub>2</sub>O hasil pembakaran mengembun)

### 2. Lower Heating Value (LHV) atau Net Heating Value

Lower Heating Value adalah jumlah panas yang diperoleh dari pembakaran tiap satuan massa bahan bakar dengan mengurangi jumlah panas yang dibawa oleh uap air yang terbentuk selama pembakaran. LHV dapat diperoleh dengan mengurangi jumlah panas hasil pembakaran dengan panas penguapan air yang terbentuk selama pembakaran. Dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\text{LHV} = \text{HHV} - \text{Panas penguapan air hasil pembakaran}$$

### 2.5.1 Solar Sebagai Bahan Bakar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar minyak hasil sulingan dari minyak bumi mentah, bahan bakar ini umumnya berwarna cokelat yang jernih (Pertamina, 2005). Penggunaan solar umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm), yang juga dapat digunakan sebagai bahan bakar 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.

Adapun spesifikasi bahan bakar solar adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Spesifikasi Bahan Bakar Solar

Parameter	Limit	
	min	maks
Sulfur Content (% wt)	-	0,5
Specific Gravity at 60°F	0,82	0,87
Cetane Number	45	48
Viscosity Kinematic	1,6	5,8
Residu Carbon % wt	-	0,1
Water Content % vol	-	0,05
Ash Content %wt	-	0,01
Flash Point °F	150	-
Calorific Value (kcal/kg)	10500	10667

Sumber : Pertamina 2005

### 2.6 Udara

Udara pada boiler pipa api 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<sub>2</sub>) 78%, oksigen (O<sub>2</sub>) 21%, carbon dioksida (CO<sub>2</sub>) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O<sub>3</sub>), 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 2 dibawah ini.

Tabel 3. Sifat-sifat Udara

Sifat	Nilai
Densitas pada 0° C	1292,8 kg/m <sup>3</sup>
Temperatur kritis	-140,7 °C
Tekanan kritis	37,2 atm
Densitas kritis	350 kg/m <sup>3</sup>
Panas jenis pada 1000 <sup>0</sup> C, 281,65 <sup>0</sup> K dan 0,89876 bar	0,28 kal/gr °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 <sup>0</sup> 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<sub>2</sub> dan 21% mol O<sub>2</sub> dan larut dalam air

## 2.7 Air Umpan

Pada proses di alat Boiler Pipa Api, 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.

Air umpan adalah air yang disuplai ke boiler untuk diubah menjadi steam. Sedangkan sistem air umpan adalah sistem penyediaan air secara otomatis untuk boiler sesuai dengan kebutuhan sistem (academia.edu : 2011). Secara umum air

yang akan digunakan sebagai umpan boiler adalah air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan terjadinya endapan yang dapat membentuk kerak pada boiler, air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan korosi terhadap boiler dan sistem penunjangnya dan juga tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan terjadinya pembusaan terhadap air boiler. Oleh karena itu untuk dapat digunakan sebagai air umpan maka air baku dari sumber air harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu, karena harus memenuhi persyaratan tertentu seperti tabel dibawah ini :

Tabel 4. Persyaratan Air Umpan Boiler

Parameter	Satuan	Pengendalian Batas
Ph		10,5 – 11,5
Konduktivitas	$\mu\text{mhos/cm}$	5000, max
TDS	Ppm	3500, max
Alkalinitas	Ppm	800, max
Silica	Ppm	150, max
Besi	Ppm	2, max
Residu Fosfat	Ppm	20 – 50
Residu Sulfur	Ppm	20 – 50
pH Kondensat		8,0 – 9,0

Sumber : PT. Nalco Indonesia

## 2.8 Proses Perpindahan Panas

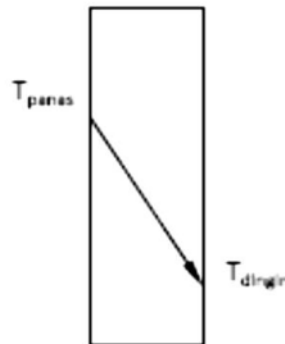
Proses perpindahan panas dari sumber panas ke penerima dibedakan atas tiga cara yaitu : (Mc. Cabe, 1999)

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

### 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.





Gambar 9. Perpindahan panas konduksi pada dinding

Sumber : (J.P. Holman, hal :33)

Laju perpindahan panas yang terjadi pada perpindahan panas konduksi adalah berbanding dengan gradien suhu normal sesuai dengan persamaan berikut.

Persamaan Dasar Konduksi :

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Keterangan :

q = Laju Perpindahan Panas (kJ /det,W)

k = Konduktivitas Termal (W/m.<sup>0</sup>C)

A = Luas Penampang (m<sup>2</sup>)

dT = Perbedaan Temperatur (<sup>0</sup>C, <sup>0</sup>F)

ΔT = Perubahan Suhu (<sup>0</sup>C, <sup>0</sup>F)

dX = Perbedaan Jarak (m/det)

$dT/dx$  = gradient temperatur ke arah perpindahan kalor. Konstanta positif “k) disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. ( J.P. Holman, hal :2)

hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradien yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda

pada setiap aktu yang dikenal dengan hukum fourier. Dalam penerapan hukum Fourier (persamaan 6) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan, (J.P. Holman, hal : 26)

$$Q = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2)$$

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan (6) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu. Konduktivitas termal pada berbagai bahan dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 5. Konduktivitas Termal Berbagai Bahan

No.	Bahan	Konduktivitas Termal K	
		W/m. <sup>0</sup> C	Btu/h. Ft. <sup>0</sup> F
<i>Logam</i>			
1.	Perak (murni)	410	237
2.	Tembaga (murni)	385	223
3.	Alumunium (murni)	202	117
4.	Nikel (murni)	93	54
5.	Besi (murni)	73	42
6.	Naja karbon, 1% C	43	25
7.	Timbal (murni)	35	20,3
8.	Baja karbon – nikel	16,3	9,4
<i>Bukan Logam</i>			
1.	Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6	24
2.	Magnesit	4,15	2,4
3.	Marmar	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
4.	Batu pasir	1,83	1,06
5.	Kaca jendela	0,78	0,45
6.	Kayu maple atau ek	0,17	0,096
7.	Serbuk gergaji	0,059	0,034
8.	Glass woll	0,038	0,022
<i>Zat Cair</i>			
1.	Air – raksa	8,21	4,74
2.	Air	0,556	0,327
3.	Ammonia	0,540	0,312
4.	Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
5.	Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042

Gas			
1.	Hydrogen	0,175	0,101
2.	Helium	0,141	0,081
3.	Udara	0,024	0,0139
4.	Steam air (jenuh)	0,0206	0,0119
5.	Karbondioksida	0,0146	0,00844

(Sumber : (J.P.Holman, hal :7)

## 2) Perpindahan Panas secara Konveksi

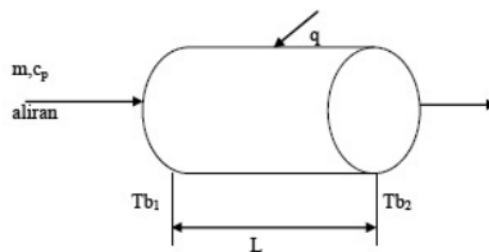
Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara ikut bergerak mengalir dalam perambatan panas atau proses perpindahan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

### 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.



Gambar 10. Perpindahan panas konveksi

Sumber : (J.P. Holman, hal: 252)

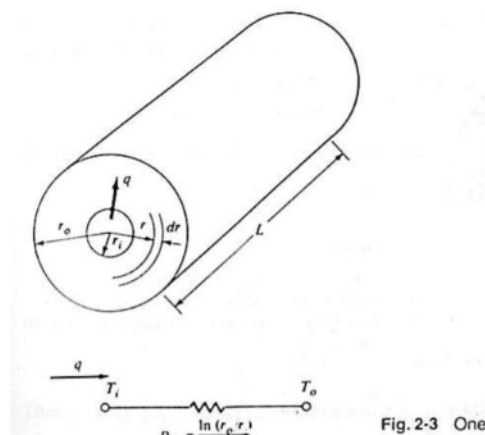
Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir di dalam saluran tertutup seperti pada gambar merupakan contoh proses perpindahan panas. Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan, (J.P. Holman, 1994 hal: 11)

$$Q = h \cdot A (T_w - T_\infty)$$

Keterangan :

- Q = Laju Perpindahan Panas (kJ/det atau W)  
 h = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m<sup>2</sup>.°C)  
 A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (ft<sup>2</sup>.m<sup>2</sup>)  
 T<sub>w</sub> = Temperatur Dinding (°C, K)  
 T<sub>∞</sub> = Temperatur Sekeliling (°C, K)

Perpindahan panas pada sistem radial silinder dapat dilihat pada gambar 9 berikut.



Gambar 11. Perpindahan Panas pada Sistem Radial Silinder

(Sumber : J.P. Holman , 1991 hal :30)

### 3) Perpindahan Panas secara Radiasi

Perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena perpindahan energi melalui gelombang elektromagnetik secara pancaran. Antara sumber energi dengan penerima panas tidak terjadi kontak, bagian dapur yang terkena radiasi adalah ruang pembakaran.

## 2.9 Kualitas Uap

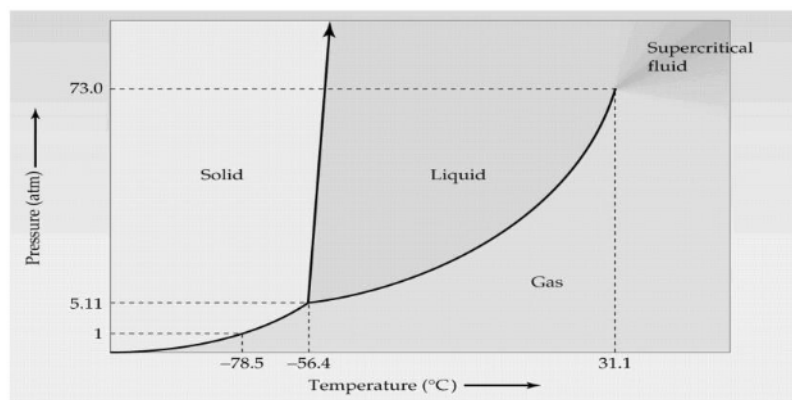
Untuk menjamin keandalan peralatan dan efisiensi dalam pengoperasian kualitas air dan uap harus tersedia pada titik penggunaan:

- Dalam jumlah yang benar untuk menjamin bahwa aliran panas yang memadai tersedia untuk perpindahan panas
- Pada suhu dan tekanan yang benar, atau akan mempengaruhi kinerja
- Bebas dari udara dan gas yang dapat mengembun yang dapat menghambat perpindahan panas
- Bersih, karena kerak (misal karat atau endapan karbonat) atau kotoran dapat meningkatkan laju erosi pada lengkungan pipa dan *orifice* kecil dari *steam traps* dan katup
- Kering, dengan adanya tetesan air dalam steam akan menurunkan entalpi penguapan aktual, dan juga akan mengakibatkan pembentukan kerak pada dinding pipa dan permukaan perpindahan panas.

Sebagai alat bantu untuk mengetahui tingkat keadaan pada suatu siklus dapat digunakan diagram fasa dan tabel uap, baik yang berbentuk manual maupun dalam bentuk piranti lunak.

## 2.10 Diagram Fasa

Sifat cairan – uap digambarkan dalam diagram fasa, pada dasarnya diagram fasa menunjukkan hubungan perubahan tekanan, volume dan temperatur dalam suatu sistem terhadap fasa-fasa utama (padat, cair, gas).



Gambar 12. Diagram fasa

Sumber : [id.wikipedia.org/wiki/diagram\\_fase](http://id.wikipedia.org/wiki/diagram_fase)

Dalam membaca diagram fasa ada beberapa istilah yang perlu diketahui yaitu:

1. Cairan subdingin (*subcooled liquid*), yaitu kondisi cairan pada temperatur di bawah titik didihnya ( $T < T_{sat}$ ) pada tekanan tertentu.
2. Cairan jenuh (*saturated liquid*), yaitu kondisi cairan tepat di temperatur didihnya pada tekanan tertentu.
3. Campuran jenuh (*saturated mixture*), yaitu kondisi campuran cairan jenuh dan uap jenuh dalam kondisi kesetimbangan pada temperatur di temperatur didihnya pada tekanan tertentu. Tekanan pada saat ini disebut tekanan penguapan (*vapor pressure*).
4. Uap jenuh (*saturated vapor*), yaitu kondisi uap tepat di temperatur didihnya pada tekanan tertentu, dimana uap itu akan mulai terkondensasi.
5. Uap superpanas (*superheated vapor*), yaitu kondisi uap pada temperatur di atas titik didihnya ( $T > T_{sat}$ ) pada tekanan tertentu.
6. Kurva cairan jenuh, yaitu kurva dimana hanya terdapat cairan jenuh saja
7. Kurva uap jenuh, yaitu kurva dimana hanya terdapat uap jenuh saja
8. Titik kritis, yaitu titik pertemuan antara kurva cairan jenuh dan uap jenuh
9. Kualitas  $x$ , dalam suatu campuran uap jenuh dan cairan jenuh, kualitas yang dimaksud disini adalah fraksi massa fasa uapnya. Besaran ini sangat penting untuk diketahui karena perbedaan yang sangat besar antara sifat termodinamika cairan dan uap.

### 2.11 Perhitungan Efisiensi Termal *Fire Tube Boiler*

Efisiensi termal *fire tube boiler* meningkat bila persentase panas yang dipindahkan ke stok atau beban di bagian dalam boiler meningkat. Efisiensi boiler dapat dihitung dengan dua cara, sama halnya dengan furnace : metoda langsung dan metoda tidak langsung. (Sumber : [www.energyefficiencyasia.com](http://www.energyefficiencyasia.com)).

#### a. Metoda Langsung

Efisiensi termal *fire tube boiler* dapat ditentukan dengan mengukur jumlah panas yang diserap oleh air umpan boiler dan membaginya dengan jumlah total bahan bakar yang dipakai.

$$\eta_{\text{termal fire tube boiler}} = \frac{\text{Panas Bahan Baku}}{\text{Panas Jenis Bahan Baku Rata-rata}} \times 100$$

(Sumber : [www.energyefficiencyasia.com](http://www.energyefficiencyasia.com))

Jumlah panas (Q) yang akan dipindahkan ke bahan baku dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = m \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (\text{Sumber : Hougen, 1943})$$

Dimana :

Q = Panas Bahan Baku (kkal)

m = Massa Bahan Baku (kg)

C<sub>p</sub> = Panas Jenis Bahan Baku Rata-rata (kkal/kg°C)

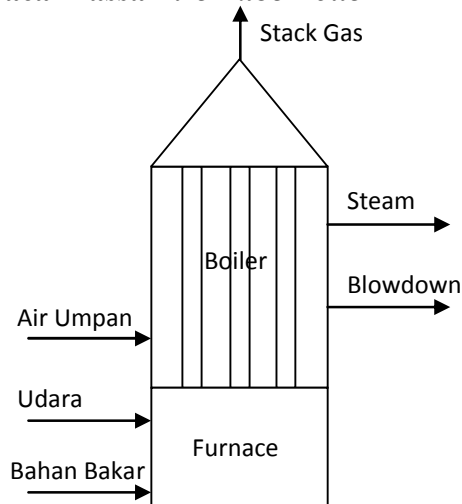
T<sub>2</sub> = Suhu Akhir Bahan Baku (°C)

T<sub>1</sub> = Suhu Awal Bahan Baku (°C)

#### b. Metoda Tidak Langsung

Efisiensi termal *fire tube boiler* dapat juga dihitung melalui metode tidak langsung langsung, hampir sama dengan evaluasi efisiensi boiler. Diagram dan cara untuk menghitung efisiensi *fire tube boiler* dengan metoda tidak langsung dapat dilihat pada gambar 13.

##### - Diagram Neraca Massa *Fire Tube Boiler*



Gambar 13. Diagram Neraca Massa *Fire Tube Boiler*

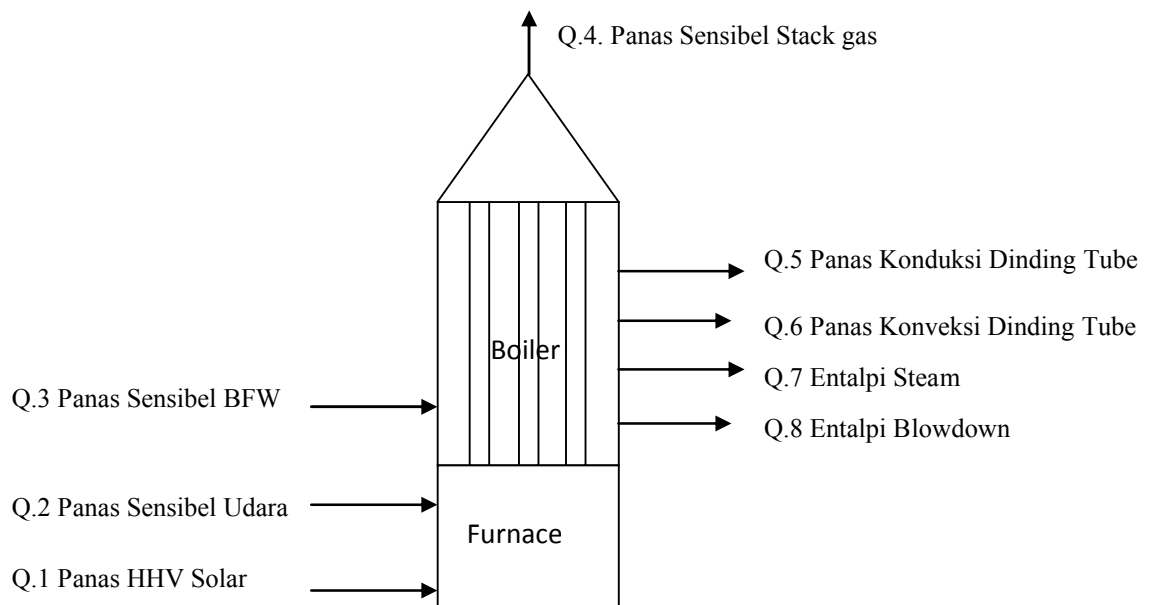
### 1) Menghitung Massa Input

- a) Menghitung massa bahan bakar yang digunakan
- b) Menghitung massa udara yang disuplai
- c) Menghitung massa air umpan boiler

### 2) Menghitung Massa Output

- a) Menghitung massa stack gas
- b) Menghitung massa steam
- c) Menghitung massa blowdown

#### - Diagram Neraca Panas *Fire Tube Boiler*



Gambar 14. Diagram Neraca Panas *Fire Tube Boiler*

### 1) Menghitung Panas Masuk

- a) Menghitung Panas dari HHV Solar

$$Q = \text{HHV Solar (kkal/kg)} \times \text{massa solar (kg)} \quad (\text{Hougen, 1943})$$



## b) Menghitung Panas Sensibel Udara

$$Q = n \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (\text{Hougen, 1943})$$

Keterangan :

n = Mol Udara (kmol)

C<sub>p</sub> = Kapasitas Panas Udara (kkal/kmol°C)T<sub>1</sub> = Temperatur Referen (K)T<sub>2</sub> = Temperatur Udara Masuk (K)

## c) Menghitung Panas Sensibel Air Umpan

$$Q = n \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (\text{Hougen, 1943})$$

Keterangan :

n = Mol air (kmol)

C<sub>p</sub> = Kapasitas Panas Air (kkal/kmol°C)T<sub>1</sub> = Temperatur Referen (K)T<sub>2</sub> = Temperatur Air Masuk (K)**2) Menghitung Panas Keluar**

## a) Menghitung Panas Sensibel Stack Gas

$$Q = n \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (\text{Hougen, 1943})$$

Keterangan :

n = Mol stack gas (kmol)

C<sub>p</sub> = Kapasitas Panas flue gas (kkal/kmol°C)T<sub>1</sub> = Temperatur Referen (K)T<sub>2</sub> = Temperatur flue gas (K)

## b) Menghitung Panas Konduksi Dinding Tube

$$Q = \frac{\sum \dot{Q}_i}{\sum \dot{Q}_o} \quad (\text{JP. Holman, 1994})$$

Keterangan :

$Q$  = Panas Konduksi Dinding Tube (kkal)

$T_1$  = Temperatur Dinding Dalam Tube ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_2$  = Temperatur Dinding Luar Tube ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Sigma R$  = Total Tahanan Termal pada Bahan ( $R_1 + R_2 + R_3$ )

$R_1$  = Tahanan Termal Karbon Steel

$R_2$  = Tahanan Termal Glass Wol

$R_3$  = Tahanan Termal Plat Stenlees

c) Menghitung Panas Konveksi Dinding Tube

$$Q = h \times A \times (T_2 - T_1) \quad (\text{JP. Holman, 1994})$$

Keterangan :

$Q$  = Panas Konveksi Dinding Tube (kkal)

$A$  = Luas Permukaan Dinding Tube ( $\text{m}^2$ )

$T_1$  = Temperatur Referen ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_2$  = Temperatur Dinding Luar Tube ( $^{\circ}\text{C}$ )

d) Menghitung Entalpi Steam

$$Q = m \times hg \quad (\text{Hougen, 1943})$$

Keterangan :

$m$  = Massa Steam (kg)

$hg$  = Entalpi Uap Jenuh (kJ/kg)

e) Menghitung Entalpi Blowdown

$$Q = m \times hf \quad (\text{Hougen, 1943})$$

Keterangan :

$m$  = Massa Steam (kg)

$hf$  = Entalpi Cair Jenuh (kJ/kg)