

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 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

Dalam proses pembakaran tidak terlepas dari tahap awal yaitu penyalaan dimana keadaan transisi dari tidak reaktif menjadi reaktif karena dorongan eksternal yang memicu reaksi termokimia diikuti dengan transisi yang cepat sehingga pembakaran dapat berlangsung. Penyalaan terjadi bila panas yang dihasilkan oleh pembakaran lebih besar dari panas yang hilang ke lingkungan. Dalam proses penyalaan ini dapat dipicu oleh energi *thermal* yang merupakan transfer energi *termal* ke reaktan oleh konduksi, konveksi, radiasi atau kombinasi dari ketiga macam proses tersebut.

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. Kualitas bahan bakar perlu diperhatikan sesuai dengan karakteristiknya sehingga homogenitas campuran bahan bakar dengan udara dapat terjadi secara sempurna agar terjadi pembakaran yang 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. 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 dlebihkan. 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

### **Temperatur Nyala Api (*Flame Temperatures*)**

Temperatur nyala (*Flame Temperatures*) adalah suhu maksimum nyala bahan bakar yang terjadi apabila tidak ada kebocoran panas ke sekelilingnya. Suhu nyala adiabatik diperlukan untuk mengetahui berapa besar panas yang terjadi ketika bahan bakar tersebut dibakar. Hal ini merupakan salah satu parameter karakteristik termal dari bahan bakar, seperti halnya bahan bakar solar yang dipakai sebagai bahan bakar. Perhitungan suhu nyala adiabatik didasarkan atas persentase massa dari kandungan carbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen di dalam bahan bakar. Dalam pembakaran, semua kalor yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi kalor produk + kalor sensibel. *Flame* temperatur adalah temperatur dimana suatu zat atau material melepaskan uap yang cukup untuk membentuk campuran dengan udara yang ada sehingga terbakar. walaupun banyak orang yang mengatakan bahwa temperatur nyala tidak dapat ditentukan secara nyata. Karena hal itulah para ahli mencari metode untuk menentukan nilainya secara teori. Temperatur nyala api ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu tergantung pada jenis bahan bakar dan oksida yang digunakan. Untuk api konvensional yang digunakan dalam fotometri nyala, temperatur nyala yang lebih tinggi diperoleh dengan oksigen digunakan sebagai oksida bukan udara, karena di dalam udara terdapat nitrogen yang dapat menurunkan suhu nyala api (Melisa, 2015).

*Flame* temperatur juga bervariasi sesuai dengan rasio masing-masing komponen dalam campuran yang mudah terbakar. jika campuran tidak masuk pembakar dalam komposisi optimal, bahan bakar kelebihan atau oksidan tidak berpartisipasi dalam reaksi dan gas *inert* seperti komponen berlebih menurunkan suhu nyala api.

Temperatur yang di dapat secara adiabatik, dimana tidak ada panas yang masuk dan panas yang keluar pada saat terjadinya pembakaran. Sedangkan, suhu pembakaran disebut dengan *flame* temperatur. Untuk menghitung *flame* temperatur digunakan rumus sebagai berikut:

$$\Delta H_{R_T} = \Delta H_{\circ R} + (\Delta H_p - H_R)$$

Rumus menghitung panas reaksi standar:

$$\Delta H_{\text{R}} = n \sum \Delta H^{\circ} \text{c} + n \cdot \lambda \text{H}_2\text{O} \quad (\text{sumber : Hougen, 1943})$$

Dimana

$\Delta H_{\text{R}_T}$  = Panas reaksi pembakaran

$\Delta H^{\circ}_{\text{R}}$  = Panas reaksi

$\Delta H_{\text{p}}$  = Panas produk

$H_{\text{R}}$  = Panas reaktan

Faktor-faktor yang mempengaruhi *flame* temperatur :

1. Temperatur Adiabatik
2. Tekanan Atmosfir
3. Bahan bakar yang terbakar
4. Ada tidaknya pengoksidasi dalam bahan bakar
5. Bagaimana stokiometri pembakaran yang terjadi

### **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 %

### **Kebutuhan Udara Teoritis**

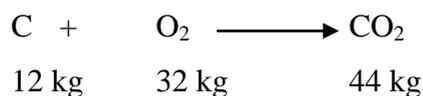
Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara :

- 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)

### **Kebocoran Udara**

Mengevaluasi bahan bakar yang terbuang yang disebabkan kebocoran udara. Kebocoran udara di bagian konveksi akan menurunkan efisiensi panas dari furnace akibat pencampuran udara luar yang bersuhu rendah dengan gas buang yang bersuhu tinggi. Persamaan beban energi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta F = \frac{(T_s - T_a)(O_{2,s} - O_{2,c})}{500}$$

Sebagai contoh, katakanlah suhu stack sebesar 600o F dan suhu udara lingkungan sebesar 100o F, bagian konveksi memiliki 10% Oksigen, dan di firebox mengandung 6% oksigen yang diukur dibawah shock tube. Berapa persen bahan bakar yang terbuang dengan adanya kebocoran udara pada bagian konveksi ?

Jawab :

$$\Delta F = \frac{(600 - 100)(10 - 6)}{500} = 4\%$$

Meminimalisir pemborosan bahan bakar yang disebabkan kebocoran udara jika mengacu pada contoh diatas, seandainya kita mengurangi udara pembakaran dengan sedikit menutup air register, sehingga kadar oksigen dalam firebox sekarang menjadi 3%. Kadar oksigen di bagian konveksi juga turun, katakanlah menjadi sekitar 9% oksigen. Perbedaan kadar oksigen di firebox dengan di bagian konveksi sekarang meningkat menjadi 6%. Hal ini disebabkan karena draft yang melewati heater meningkat (berarti tekanan lebih negatif), dan lebih banyak udara yang diisap melewati lubang-lubang atau dari kebocoran udara pada bagian konveksi. Jika kita masih mempertahankan suhu stack 600°F dan suhu lingkungan 100°F, kita mendapatkan sekarang 6% bahan bakar yang terbuang. Sehingga akan lebih banyak lagi bahan bakar yang harus dibakar di dalam firebox untuk mengimbangi meningkatnya kebocoran udara.

Seandainya kita mengatur air register kembali seperti semula, dan sebagai gantinya kita menjepit stack damper, sehingga kita bisa menurunkan laju alir udara dengan stack damper hingga oksigen pada firebox turun dari 6% menjadi

3%. Oksigen pada bagian konveksi juga turun katakanlah 5%. Pada kasus ini kita melihat bahwa  $\Delta O_2$  juga berkurang menjadi hanya 2%. Hal ini dikarenakan berkurangnya draft yang melewati heater, yang berarti tekanan pada bagian konveksi meningkat sehingga menurunkan laju kebocoran udara. Hal ini menunjukkan bagaimana kebocoran udara bervariasi sesuai dengan kombinasi operasi antara stack damper dan air register.

### Udara Berlebih (*Excess Air*)

Konsentrasi oksigen pada gas buang merupakan parameter penting untuk menentukan status proses pembakaran karena dapat menunjukkan kelebihan  $O_2$  yang digunakan. Secara kuantitatif udara lebih dapat ditentukan dari :

- a. Komposisi gas buang yang meliputi  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  dan CO
- b. Pengukuran secara langsung udara yang disuplai

Rumus untuk menghitung udara berlebih dari komposisi gas buang adalah :

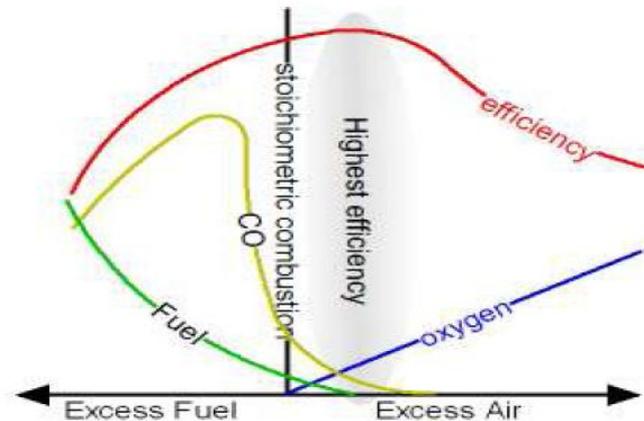
$$\% \text{ Udara Berlebih} = \frac{\text{udara suplai} - \text{udara teoritis}}{\text{udara teoritis}} \times 100 \% \text{ (Himmelblau, 1991)}$$

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 1.

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).

## 2.2 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.



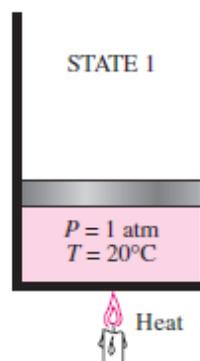
Gambar 1. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran dengan Udara Berlebih

(Sumber : Totok Gunawan, 2010)

Penjelasan secara lebih rinci mengenai perubahan fase pada zat murni, contohnya air akan dijelaskan sebagai berikut:

### **Cair Tekan (*Compressed Liquid*)**

Untuk memudahkan dalam menjelaskan proses ini maka lihat pada Gambar 2 dimana sebuah alat berupa torak dan silinder yang berisi air pada  $20^{\circ}\text{C}$  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.

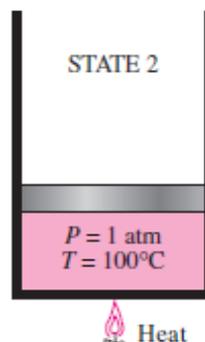


**Gambar 2. Air pada Fase Cair Tekan (*Compressed Liquid*)**

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

### Cair Jenuh (*Saturation Liquid*)

Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai  $100^{\circ}\text{C}$ . 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 3.

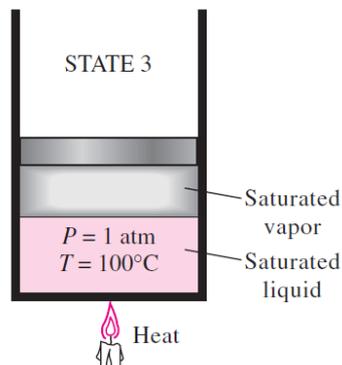


**Gambar 3. Air pada Fase Cair Jenuh (*Saturated Liquid*)**

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

### 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.

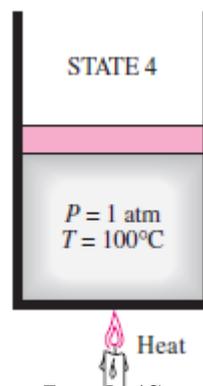


**Gambar 4. Campuran Air dan Uap**

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

### Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)

Jika kalor terus ditambahkan, maka proses penguapan akan terus berlangsung sampai seluruh cairan berubah menjadi uap, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi.

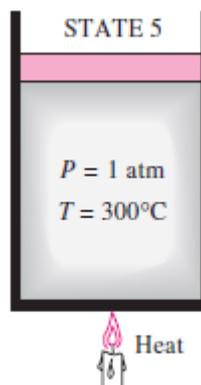


**Gambar 5. Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)**

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

### Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

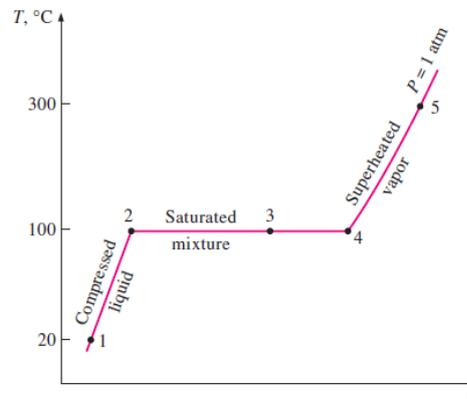
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap pada tekanan 1 atm yaitu 100°C.



**Gambar 6. 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 8.



**Gambar 7. Diagram T-v Pemanasan Air pada Tekanan Konstan**

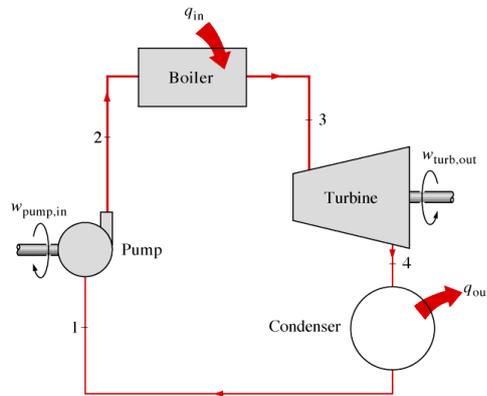
Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles (1994)

### 2.3 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. Pembangkit jenis ini memanfaatkan uap yang dihasilkan oleh boiler sebagai sumber energi untuk menggerakkan turbin dan sekaligus memutar generator sehingga akan dihasilkan tenaga listrik. Sistem pembangkit tenaga uap yang sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu *boiler*, turbin uap, kondenser dan pompa kondensat. Skema pembangkit listrik tenaga uap dapat ditunjukkan pada Gambar 8.

Sistem kerja PLTU menggunakan bahan bakar minyak residu/MFO (solar) 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.



**Gambar 8. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Uap**

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

### 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.

### **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.

## 2.4 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 di 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).

### **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 dimaksudkan 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 giliran 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.

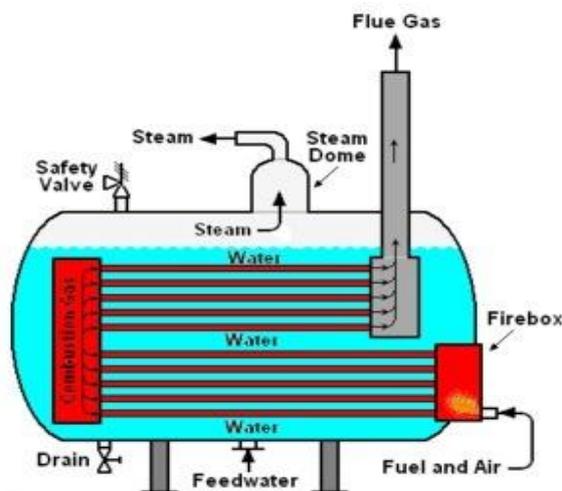
h. Efisiensi Pembakaran dan Kelebihan Udara

Pada boiler listrik, semua energi yang disuplai 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 suplai 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.

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

Boiler jenis ini pada bagian tubenya dialiri dengan gas pembakaran dan bagian lainnya yaitu sell dialiri air yang akan diuapkan. Tube-tubunya 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 dibutuhkan. 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.

### **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.

### **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.

### **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

kebetuk asalnya dalam misalnya besi menjadi oksida besi, alumunium dan lain-lain. Peristiwa koros 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 diffrensial). 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. Bentuk korosi yang tidak umum tetapi berbahaya adalah bentuk korosi embrittlement atau keretakan inter kristalin pada baja yang terjadi jika berada pada tekanan yang tinggi dan lingkungan kimia yang tidak sesuai. Caustic embrittlement atau keretakan inter kristalin pada baja yang terjadi jika berada pada tekanan yang tinggi dan lingkungan kimia yang tidak sesuai. Caustic embrittlement terjadi pada sambungan penyumbat dan meluas pada ujung tabung dimana celah memungkinkan perkembangan lingkungan caustic yang terkonsentrasi. Hidrogen embrittlement adalah bentuk lain dari retakan interkristalin yang terjadi pada tabung air boiler yang disebabkan tekanan tinggi dan kondisi temperatur yang tertentu. 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 kecenderungan 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

### 2.5 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.

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	- Dibakar dengan minyak - Dibakar dengan gas - Dibakar dengan batubara
Cara pengisian bahan bakar	- Berselang/ <i>Batch</i> - Berkala - Kontinyu
Cara perpindahan panas	- Radiasi (tempat perapian terbuka) - Konveksi (pemanasan melalui media)
Cara pemanfaatan kembali limbah	- <i>Rekuperatif</i> - <i>Regeneratif</i>

Sumber : [energyeficienciasia.org](http://energyeficienciasia.org)

### **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. 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.

### **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.

### **Operasi Burner**

Pada prinsipnya burner adalah transduser 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, 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 setpoint O<sub>2</sub> 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.

### **Produksi Nox**

Emisi NO<sub>x</sub> merupakan isu yang sangat penting saat ini. NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> dan meningkatkan efisiensi. Semakin banyak udara excess, semakin banyak pula oksigen yang tersedia untuk memproduksi NO<sub>x</sub>.

## 2.6 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 :

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

### 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 :

- Warna sedikit kekuningan dan berbau
- Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- 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

### Karakteristik Umum Minyak Solar

Karakteristik umum yang perlu diketahui untuk menilai kinerja bahan bakar solar antara lain viskositas, angka setana, titik tuang, nilai kalor

pembakaran, volatilitas, kadar residu karbon, kadar air dan sedimen, indeks diesel, titik embun, kadar sulfur, dan titik nyala.

#### 1) Viskositas

Viskositas adalah tahanan yang dimiliki fluida yang dialirkan dalam pipa kapiler terhadap gaya gravitasi, biasanya dinyatakan dalam waktu yang diperlukan untuk mengalir pada jarak tertentu. Jika viskositas semakin tinggi, maka tahanan untuk mengalir akan semakin tinggi. Karakteristik ini sangat penting karena mempengaruhi kinerja injektor pada ruang bakar. Atomisasi bahan bakar sangat bergantung pada viskositas, tekanan injeksi, serta ukuran lubang injektor. Viskositas lebih tinggi akan membuat bahan bakar teratomisasi menjadi tetesan yang lebih besar dengan momentum tinggi dan memiliki kecenderungan untuk bertumbukkan dengan dinding silinder yang lebih dingin. Hal ini menyebabkan pemadaman *flame* dan peningkatan emisi mesin. Bahan bakar dengan viskositas lebih rendah memproduksi *spray* yang terlalu halus dan tidak dapat masuk lebih jauh ke dalam silinder pembakaran, sehingga terbentuk daerah *fuel rich zone* yang menyebabkan pembentukan jelaga. Viskositas juga menunjukkan sifat pelumasan yang lebih baik. Pada umumnya bahan bakar harus mempunyai viskositas yang relatif rendah agar dapat mudah mengalir dan teratomisasi.

#### 2) Angka Setana

Angka setana menunjukkan kemampuan bahan bakar untuk menyala sendiri. Skala untuk angka setana biasanya menggunakan referensi berupa campuran antara normal setana ( $C_{16}H_{34}$ ) dengan *alpha methyl naphthalene* ( $C_{10}H_7CH_3$ ). Normal setana memiliki angka setana 100, *alpha methyl naphthalene* memiliki angka setana 0. Angka setana suatu bahan bakar biasanya didefinisikan sebagai presentase volume dari normal setana dengan campurannya tersebut.

Angka setana yang tinggi menunjukkan bahwa bahan bakar dapat menyala pada temperatur yang relatif rendah, dan sebaliknya angka setana rendah menunjukkan bahan bakar baru dapat menyala pada temperatur yang relatif tinggi. Penggunaan bahan bakar solar yang mempunyai angka setana yang tinggi dapat mencegah terjadinya *knocking* karena begitu bahan bakar

diinjeksikan ke dalam silinder pembakaran maka bahan bakar akan langsung terbakar dan tidak terakumulasi.

### 3) Berat Jenis

Berat jenis menunjukkan perbandingan berat per satuan volume, karakteristik ini berkaitan dengan nilai kalor dan daya yang dihasilkan oleh pembakaran per satuan volume bahan bakar. Berat jenis bahan bakar solar diukur dengan menggunakan metode ASTM D287 atau ASTM D1298 dan mempunyai satuan kilogram per meter kubik ( $\text{kg/m}^3$ )

### 4) Titik Tuang

Titik tuang adalah titik temperatur terendah dimana mulai terbentuk kristal kristal parafin yang dapat menyumbat saluran bahan bakar. Titik tuang ini dipengaruhi oleh derajat ketidakjenuhan (angka iodium). Semakin tinggi ketidakjenuhan maka titik tuang semakin rendah. Titik tuang juga dipengaruhi oleh panjang rantai karbon, semakin panjang rantai karbon, maka semakin tinggi dengan titik tuang. Karakteristik ini ditentukan dengan menggunakan metoda ASTM D97

### 5) Nilai Kalor Pembakaran

Nilai kalor pembakaran menunjukkan energi kalor yang dikandung dalam setiap satuan massa bahan bakar. Nilai kalor dapat diukur dengan bomb kalorimeter kemudian dimasukkan dalam rumus :

$$\text{Nilai kalor (kcal/kg)} = (8100 C + 3400 (H - 0/8)) : 100$$

Nilai kalor H, C, dan O dinyatakan dalam presentase berat setiap unsur yang terkandung dalam satu kilogram bahan bakar

### 6) Volatilitas

Adalah sifat kecenderungan bahan bakar untuk berubah fasa menjadi fasa uap. Tekanan uap yang tinggi dan titik didih yang rendah menandakan tingginya volatilitas

### 7) Kadar Residu Karbon

Kadar residu karbon menunjukkan kadar fraksi hidrokarbon yang mempunyai titik didih lebih tinggi dari range bahan bakar. Adanya fraksi hidrokarbon ini

menyebabkan menumpuknya residu karbon dalam ruang pembakaran yang dapat mengurangi kinerja dalam pembakaran

#### 8) Indeks Bias

Indeks bias adalah suatu parameter mutu penyalan pada bahan bakar selain angka setana. Mutu penyalan dari bahan bakar solar dapat diartikan sebagai waktu yang diperlukan untuk bahan bakar agar dapat menyala di ruang pembakaran dan diukur setelah penyalan terjadi. Cara menentukan indeks bias dari suatu bahan bakar solar dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\text{Indeks Bias} = (\text{Titik Anilin } (^{\circ}\text{F}) \times \text{API Gravity}) : 100$$

#### 9) Titik Embun

Titik embun adalah suhu dimana mulai terlihatnya cahaya yang berwarna suram relatif terhadap cahaya sekitarnya pada permukaan minyak diesel dalam proses pendinginan. Karakteristik ini ditentukan dengan menggunakan metoda ASTM D97

#### 10) Kadar Sulfur

Kadar sulfur dalam bahan bakar solar dari hasil penyulingan pertama sangat bergantung pada asal minyak mentah yang akan diolah. Pada umumnya dalam bahan bakar solar adalah 50-60 % dari kandungan dalam minyak mentahnya.

#### 11) Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala adalah temperatur terendah dimana bahan bakar dapat menyala. Hal ini berkaitan dengan keamanan dalam penyimpanan dan penanganan bahan bakar.

### **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 SO<sub>2</sub> 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.

## 2.7 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. Sifat-sifat dari udara dapat dilihat pada Tabel 3.

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 :

- a. Mempunyai sifat yang tidak mudah terbakar, tetapi dapat membantu proses pembakaran.
- b. Terdiri dari 79% mol N<sub>2</sub> dan 21% mol O<sub>2</sub> dan larut dalam air

## 2.8 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 4. :

Tabel 4. Persyaratan Air Umpan Boiler

Parameter	Satuan	Pengendalian Batas
Ph		10,5 – 11,5
Konduktivitas	$\mu$ 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

## 2.9 Proses Perpindahan Panas

Proses perpindahan panas dari sumber panas ke penerima dibedakan atas tiga cara yaitu perpindahan panas secara konveksi, perpindahan panas secara konduksi dan perpindahan panas secara radiasi. (Mc. Cabe, 1999)

### 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.

### 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.

### 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.