

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

2.1.1 Pengertian Boiler

Boiler atau ketel uap merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menghasilkan *steam* (uap) dalam berbagai keperluan. Air di dalam *boiler* dipanaskan oleh panas dari hasil pembakaran bahan bakar sehingga terjadi perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke media air yang mengakibatkan air tersebut menjadi panas atau berubah wujud menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar (MF Syahputra.2010).

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*. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat ukur tekanan.

2.1.2 Fungsi Boiler

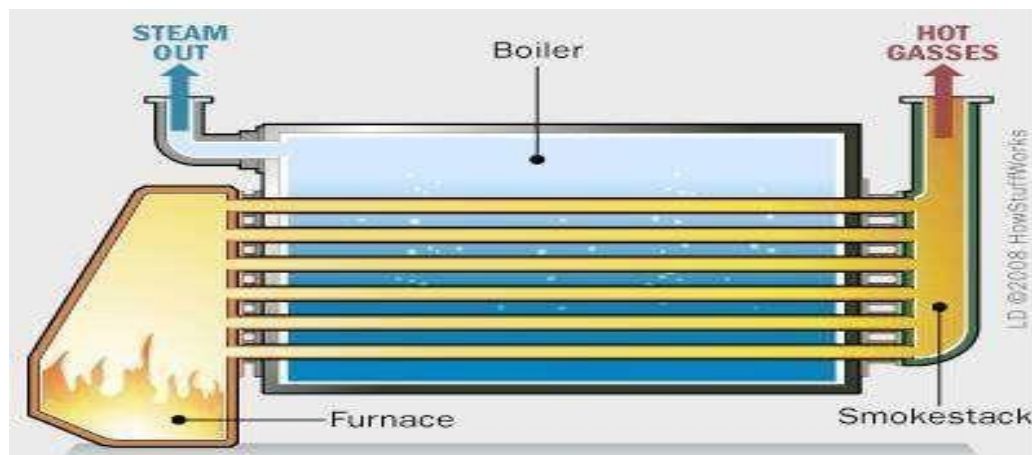
Fungsi dari *boiler* adalah menghasilkan uap yang digunakan untuk kebutuhan proses pabrik dan membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik maupun perumahan karyawan di sekitar pabrik, cara menghasilkan listrik dari *boiler* yaitu menghubungkan *boiler* dengan turbin dan generator yang berfungsi merubah gerak menjadi energi listrik. Adanya pengaruh pengotoran baik yang ditimbulkan dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi *boiler* (Asmudi, 2008). Sedangkan menurut Djokosetyardj M.J (1990), *Boiler* merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan uap / *steam* untuk berbagai keperluan. Jenis air dan uap air sangat dipengaruhi oleh tingkat efisiensi *boiler* itu sendiri. Pada mesin *boiler*, jenis air yang digunakan harus

demineralisasi terlebih dahulu untuk mensterilkan air yang digunakan, sehingga pengaplikasian untuk dijadikan *steam* dapat dimaksimalkan dengan baik.

2.1.3 Jenis-Jenis Boiler

A. Ketel Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa –pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa –pipa api tersebut. Pipa - pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan. Volume air kira – kira $\frac{3}{4}$ dari tangki ketel.



Gambar 2.1 Boiler Pipa Api

(Sumber : science.howstuffworks.com/Water Tube Boiler)

Jumlah pass dari *boiler* tergantung dari jumlah laluan vertikal dari 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). *Fire tube boiler* juga biasanya digunakan untuk kapasitas *steam* yang relative kecil dengan tekanan *steam* rendah sampai sedang yang kompetitif untuk kecepatan *steam* sampai 12 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boiler* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas dalam operasinya.

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 :

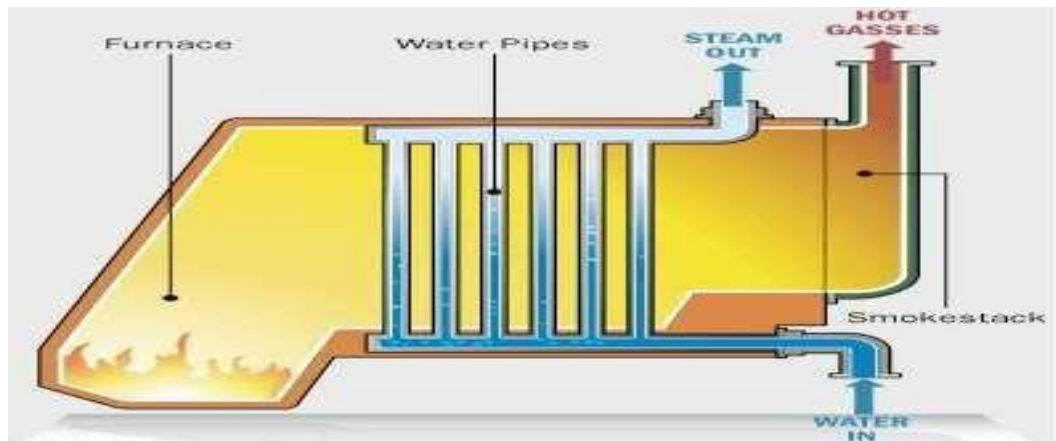
- a. Kapasitas yang digunakan
- b. Kondisi *steam* yang dibutuhkan
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan
- d. Konstruksi yang sederhana dan perawatan mudah
- e. Tidak perlu air isian yang berkualitas tinggi

Keuntungan *boiler* pipa api adalah proses pemanasan yang cepat dan mudah serta tidak membutuhkan setting khusus, bentuknya lebih *portable* dan *compact*, investasi awal lebih murah, dan tidak membutuhkan area yang luas untuk 1 HP *boiler*. Kekurangan *boiler* pipa air adalah tekanan operasi *steam* terbatas untuk tekanan rendah 18 bar, kapasitas *steam* relative kecil (13,5 THP) jika dibandingkan dengan *boiler* pipa air, tempat pembakarannya sulit dijangkau untuk dibersihkan, diperbaiki, dan diperiksa kondisinya, serta nilai efisiensinya rendah karena banyak energi kalor yang terbuang langsung menuju *stack*.

B. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Ketel pipa air, yaitu ketel uap dengan air atau uap berada di dalam pipa - pipa atau tabung dengan pipa api atau asap berada diluarnya. Di dalam *water tube boiler*, air umpan *boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam *drum*. *Steam* terbentuk karena sirkulasi air yang dipanaskan oleh gas pembakar yang terjadi di daerah uap di dalam *drum*. Sebagai ketel yang sudah sangat modern, *water tube boiler* biasanya dirancang dengan tekanan sangat tinggi dan memiliki kapasitas *steam* antara 4.500-12.000 kg/jam (UNEP, 2006).

Umumnya *water tube boiler* terdiri dari beberapa *drum* (biasanya 2 atau 4 buah) dengan eksternal *tubes*. Biasanya ujung-ujung *tubes* disambung atau dihubungkan langsung dengan *drum-drum* dengan cara di roll atau di ekspansi, kadang kala sambungan antara *tubes* dengan *drum* selain di roll juga diperkuat dengan las atau seal welded.¹³ Apabila kapasitas *boiler* lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi *boiler* lebih besar dari 24 bar. Maka *boiler* dianggap cocok untuk produksi uap dalam jumlah besar dengan skala industri dengan uap yang dihasilkan yaitu *superheated* (Dalimunthe, 2006).



Gambar 2.2 Boiler Pipa Air

(Sumber : science.howstuffworks.com/Water Tube Boiler)

Prinsip kerjanya yaitu proses pengapian terjadi di luar pipa, kemudian panas yang dihasilkan memanaskan pipa berisi air. *Steam* yang dihasilkan terlebih dahulu dikumpulkan di dalam *steam drum*. Sampai tekanan dan temperatur sesuai, *saturated steam* dipanaskan lagi oleh *superheater* untuk menghasilkan *superheated steam* hingga mengalir ke *outlet* sistem sebagai *superheated steam* melalui pipa distribusi. Bahan bakar yang banyak digunakan pada *boiler* jenis ini adalah minyak solar dan gas (Muzaki & Mursadin, 2019).

Keuntungan *boiler pipa* air adalah mampu menghasilkan uap dengan tekanan lebih tinggi dibandingkan *boiler* pipa api, untuk daya yang sama *boiler* pipa air mampu menempati ruang yang lebih kecil, laju aliran uap lebih tinggi, permukaan pemanasan lebih efektif karena gas panas mengalir keatas pada arah tegak lurus, dan pecahnya pipa air tidak menimbulkan kerusakan ke seluruh ketel. Kekurangan *boiler* pipa air adalah air umpan mensyaratkan mempunyai kemurnian tinggi untuk mencegah endapan kerak di dalam pipa karena jika sampai terbentuk endapan ataupun kerak bisa menimbulkan panas yang berlebihan lalu pecah, kemudian ketel pipa air memerlukan perhatian yang lebih hati-hati pada penguapannya, dan pembersihan pipa air tidak mudah dilakukan.

2.1.4 Komponen- komponen boiler

a. *Furnace* (Ruang bakar)

Furnace (ruang bakar) berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar. Bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang bakar sehingga terjadi

pembakaran. Dari pembakaran bahan bakar dihasilkan sejumlah panas dan nyala api/gas asap. Dinding ruang bakar umumnya dilapisi dengan pipa-pipa. Semakin cepat laju peredaran air, pendinginan dinding pipa bertambah baik dan kapasitas *steam* yang dihasilkan bertambah besar.

b. *Burner*

Burner Pada prinsipnya 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 se-efisien mungkin dan menghasilkan *heat flux* yang optimum.

c. *Steam Drum*

Steam drum adalah salah satu komponen pada *boiler* pipa air yang berfungsi sebagai reservoir campuran air dan uap air, dan juga berfungsi untuk memisahkan uap air dengan air pada proses pembentukan uap *superheater*.

d. *Superheater*

Superheater merupakan tempat pengeringan *steam* dan siap dikirim melalui *main steam pipe* dan siap untuk menggerakkan turbin *steam* atau menjalankan proses industri.

e. *Safety valve*

Komponen ini merupakan saluran buang *steam* jika terjadi keadaan dimana tekanan *steam* melebihi kemampuan *boiler* menahan tekanan *steam*. *Valve* ini terdiri dari *valve* pengaman *saturated steam* dan *valve* pengaman *superheated steam*.

f. *Blowdown valve*

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

g. *Water Level Volume*

Water level volume merupakan alat yang berfungsi untuk mendeteksi volume air, ketinggian air, dan kualitas air didalam *drum*.

h. Valve

Valve merupakan alat yang berfungsi untuk mengatur jumlah dan tekanan uap yang akan disuplai, selain itu berfungsi untuk menghentikan aliran uap untuk disuplai.

i. Temperature Indicator

Temperature instrument merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur temperatur *steam* yang dihasilkan dalam *steam drum* pada *boiler*.

j. Pressure Indicator

Pressure instrument merupakan alat yang berfungsi untuk mengukur tekanan *steam* yang dihasilkan dalam *steam drum* pada *boiler*.

k. Feed Water Drum

Feed water drum merupakan bagian penting dari operasi *boiler*, yaitu sebagai tempat penampungan air umpan *boiler*. Air umpan dimasukkan ke dalam *feed water drum* dari pompa umpan, kemudian air dialirkan ke seluruh *water tube* yang ada di *boiler*.

L. Water Tube

Water tube berfungsi sebagai tempat pemanasan air umpan *boiler* yang akan dikonversi menjadi *steam*. Selain itu, *water tube* juga sebagai penghubung antara *steam drum* dengan *feed water drum* untuk mengalirkan air dalam sistem,

2.1.5 Sistem Boiler

Sistem yang dimiliki *boiler* untuk memenuhi kebutuhan *steam* terbagi menjadi beberapa sistem yaitu sistem air umpan (*feed water system*), sistem uap (*steam system*), dan sistem bahan bakar (*fuel system*) (UNEP, 2006).

- a. Sistem air umpan (*feed water system*), merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam *boiler*.
- b. Sistem uap (*steam system*), merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses produksi *steam* dan mengumpulkan berbagai data dalam *boiler* dengan cara mengalirkan uap ke titik pengguna dengan menggunakan sistem pemipaan.

- c. Sistem bahan bakar (*fuel system*), merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara menyuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

2.2 Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan pada uji kinerja *water tube boiler* adalah LPG. Berikut adalah pembahasan jenis bahan bakar tersebut.

2.2.1 LPG (*liquified petroleum gas*)

LPG (*liquified petroleum gas*) adalah campuran dari berbagai unsur hidrokarbon yang berasal dari gas alam atau kilang *crude oil*. Dengan menambah tekanan dan menurunkan suhunya, gas berubah menjadi cair. Komponennya didominasi propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}). Elpiji juga mengandung hidrokarbon ringan lain dalam jumlah kecil, misalnya etana (C_2H_6) dan pentana (C_5H_{12}). Sebagai bahan bakar, gas LPG mudah terbakar apabila terjadi persenyawaan di udara (PT. Aptogas Indonesia, 2015) Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1.

LPG dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak pada kendaraan dengan begitu mesin kendaraan akan lebih awet dalam penggunaannya serta memberikan pasokan energi bagi sarana transportasi untuk kebutuhan masyarakat dengan jangka waktu yang relatif lama (yulianto, Farid, & Suyatno, 2013).

2.3 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan oksidasi cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dan cahaya. Pembakaran sempurna bahan bakar terjadi hanya jika ada pasokan oksigen yang cukup. Dalam setiap bahan bakar, unsur yang mudah terbakar adalah karbon, hidrogen dan sulfur (Wahjudi, 2017). Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Hal ini dilakukan dengan pengontrolan “tiga T” yaitu:

- a. T- Temperatur Temperatur yang digunakan untuk 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 harus cukup agar input panas dapat terserap oleh reaktan sehingga berlangsung proses termokimia. Dalam proses pembakaran tidak terlepas dari penyalaan yaitu sebuah keadaan transisi dari tidak reaktif ke reaktif karena rangsangan atau dorongan eksternal yang memicu reaksi termokimia diikuti dengan transisi yang cepat sehingga pembakaran dapat berlangsung. Proses tersebut, Kimia yaitu dengan memasukan bahan kimia reaktif.

Dalam suatu pembakaran perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting dalam menentukan hasil proses pembakaran. Rasio campuran bahan bakar dan udara dapat dinyatakan dalam beberapa parameter yang lazim antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan *Rasio Ekuivalen* (ϕ) (Mahardi, 2010) .

Pada reaksi oksidasi yang berlangsung cepat di hasilkan sejumlah energi elektromagnetik (cahaya), energi panas dan energi mekanik (suara) Pada semua jenis pembakaran, kondisi campuran udara dan bahan bakar merupakan faktor utama yang harus diperhatikan untuk mendapatkan campuran yang sempurna, pada reaksi pembakaran pada unsur – unsur yang dapat terbakar dari bahan bakar menghasilkan pembebasan energi yang tergantung pada produk pembakaran yang terbentuk tiga unsur utama yang dapat terbakar pada sebagian besar bahan bakar adalah karbon, hidrogen dan belerang.

Pada reaksi pembakaran, berlaku kekekalan massa sehingga massa dari produk pembakaran sama dengan massa dari reaktan. total massa untuk masing-masing unsur yang bereaksi sebelum dan sesudah reaksi adalah sama meskipun masing-masing unsur memiliki rumus kimia yang berbeda. Oksigen yang digunakan dalam proses pembakaran biasanya berasal dari udara yang mengakibatkan terikutnya unsur lain dalam unsur yang tidak dapat terbakar dalam bahan bakar dan akan melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan dan akan membentuk polutan ($\square\square_2$). Definisi lain dari pembakaran adalah : “reaksi kimia yang meliputi kombinasi bahan bakar dan oksigen yang menghasilkan panas produk pembakaran”. Dari beberapa definisi diatas terlihat bahwa proses pembakaran selalu membutuhkan oksigen sebagai oksidan, hal ini sangat bertentangan dengan realita yang terjadi, bahwa selama proses pembakaran sebagai oksidannya adalah udara yang pada kenyataannya mengandung 21%

Oksigen 78% Nitrogen dan 1% merupakan unsur lain. Dan untuk tujuan perhitungan, gas nitrogen dianggap hanya melewati proses pembakaran tanpa mengalami perubahan. Pada dasarnya proses pembakaran terdiri dari dua kondisi, yaitu :

- a. Kondisi pembakaran stoikiometrik (teoritis)
- b. Kondisi pembakaran dengan *excess air* (aktual)

2.3.1 Kondisi pembakaran stoikiometrik (teoritis)

Kondisi pembakaran stoikiometrik adalah dimana relatif jumlah bahan bakar dan udara secara teoritis dibutuhkan minimal untuk memberikan pembakaran yang sempurna, dan dapat dihitung melalui analisa pada bahan bakar gas yang bereaksi dengan oksigen. Pada penelitian ini menggunakan LPG sesuai dengan spesifikasi yang dikeluarkan oleh Pertamina yang meliputi ethana (C_2H_6), propane (C_3H_8), isobutana (C_4H_{10}), normal-butana (C_4H_{10}), iso-pentana (C_5H_{12}) sedangkan untuk perhitungan stoikiometrik hanya unsur yang dominan : propane (C_3H_8), i-butana (C_4H_{10}), n-butana (C_4H_{10}).

Tabel 2.1 Spesifikasi Bahan Bakar (LPG)

Jenis BB	Rumus Kimia	Berat Mol (gr/mol)	% berat	Jumlah Mol (mol/gr)	Fraksi Mol
Propane	C_3H_8	44	11	0,25	0,14
i-butana	C_4H_{10}	58	31	0,53	0,30
n-butana	C_4H_{10}	58	58	1,00	0,56
Jumlah			100	1,78	1,00

(sumber; Pertamina, 2020)

Kondisi pembakaran secara stoikiometri pada umumnya sulit untuk dicapai, hal ini dikarenakan laju reaksi yang terbatas dan adanya proses pencampuran bahan bakar yang tidak sempurna, sehingga pembakaran biasanya diekspresikan dengan *excess air*. Hal ini akan menjamin tidak adanya bahan bakar yang terbuang dan sempurnanya proses pembakaran.

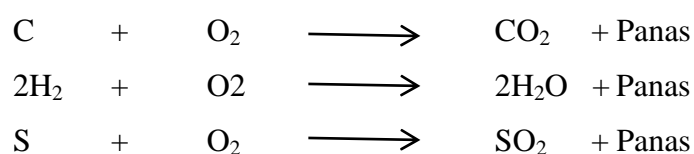
2.3.2 Kondisi pembakaran dengan *excess air* (aktual)

pembakaran dalam prakteknya adalah sukar untuk daerah kondisi stoikiometrik. Beberapa *burner* untuk industri beroperasi pada rasio udara/gas yang mendekati nilai teoritisnya tetapi sebagian besar burner penentuan udaranya

melebihi kondisi stoikiometrinya, hal ini untuk meyakinkan bahwa pembakaran terjadi dengan sempurna. Alasan utama untuk menentukan udara lebih (*excess air*) adalah kegagalan aliran gas dan udara untuk bercampur secara sempurna sebelum terjadinya proses pembakaran. Terjadinya pembakaran tergantung pada tumbukan molekul bahan bakar dengan molekul oksigen. Jika terjadi kekurangan campuran pada kedua fluida tersebut, maka oksigen harus diberikan untuk menambah terjadinya tumbukan molekul. Metode yang tepat untuk menentukan udara aktual didalam sebuah sistem pembakaran terhadap jumlah ketentuan teoritisnya diekspresikan sebagai ratio udara aktual yang digunakan (vol/vol bahan bakar) terhadap kebutuhan udara stoikiometrik (vol/vol bahan bakar).

2.3.3 Reaksi Kimia pada Proses Pembakaran

Reaksi pembakaran adalah reaksi kimia bahan bakar dan oksigen yang diperoleh dari udara yang akan menghasilkan panas dan gas sisa pembakaran yang berlangsung dalam waktu yang sangat cepat. Dalam pembakaran, proses yang terjadi adalah oksidasi dengan reaksi sebagai berikut :



Reaksi pembakaran merupakan reaksi oksidasi antara senyawa hidrokarbon dengan oksigen sehingga dihasilkan produk berupa karbon dioksida, uap air, oksida nitrogen atau produk lainnya tergantung pada kualitas pembakaran.

2.3.4 Campuran Udara-Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air-fuel Ratio*), *excess air*, dan Rasio Ekuivalen (Φ).

2.3.4.1 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air-fuel Ratio/AFR*)

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau.

Air Fuel Ratio adalah rasio perbandingan antara massa bahan bakar dengan udara yang terjadi pada suatu reaksi pembakaran sehingga memegang peranan penting dalam menentukan jalannya proses pembakaran tersebut. AFR juga berperan dalam pembentukan nyala api dan hasil gas buang dari proses pembakaran. Persamaan AFR pada campuran stoikiometri dituliskan dalam rumus sebagai berikut :

$$AFR_{\text{Stoikiometri}} = n_{\text{udara}} / n_{\text{bahan bakar}}$$

Keterangan :

$AFR_{\text{Stoikiometri}}$: Rasio udara bahan bakar dalam keadaan stoikiometri

n_{udara} : Jumlah mol udara

$n_{\text{bahan bakar}}$: Jumlah mol bahan bakar

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

2.3.4.2 Udara Berlebih (*Excess Air – XSA*)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual . Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada.

Udara lebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*).

2.3.5 Karakteristik Nyala Api

2.3.5.1 Batas Mampu Nyala

Dalam kenyataannya terjadinya nyala api dapat tercapai jika terjadi campuran antara oksidator dan bahan bakar yang mendukung. Ada kisaran

campuran bahan bakar dan oksidator yang dapat menyebabkan nyala api. Kisaran itu yaitu kisaran batas bawah mampu nyala dan batas atas mampu nyala atau yang lebih dikenal sebagai *lower and upper flammability limits*. Contohnya untuk kasus gas metana, nyala api hanya akan terjadi pada kisaran campuran gas methana terhadap volume udara total sebesar 5-15%.

Faktor dan kimia diketahui dapat mempengaruhi karakteristik nyala, variabel-variabel fisik diantaranya adalah temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia diantaranya adalah rasio campuran, penambahan *inert* dan struktur hidrokarbon.

Pengaruh komposisi campuran sangat penting bagi kecepatan pembakaran, nyala hanya akan merambat pada konsentrasi campuran tertentu. Konsentrasi bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala terbawah, dan biasanya konsentrasi bahan bakar dan udara dikondisikan pada keadaan standar yaitu campuran stoikiometri. Dengan penambahan konsentrasi bahan bakar pada campuran, maka campuran akan kaya dan oksigen berkurang, kecepatan pembakaran turun dan api akan padam, hal ini juga berkaitan dengan batas nyala yang dinamakan batas nyala atas.

2.3.5.2 Kestabilan Nyala Api

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

1. Ketidakstabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
2. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.
3. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
4. Ketidakstabilan Landau, Ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun buoyancy tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat (*incompressible*).
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer.

2.4 Dasar Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan ke keadaan lain. Berbagai aplikasi teknik yang menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan sistem-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi. (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.4.1 Hukum Termodinamika I

Bunyi hukum Termodinamika I adalah „Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya saja.“

Berdasarkan uraian tersebut terbukti bahwa kalor (Q) yang diserap sistem tidak hilang namun akan diubah menjadi usaha luar (W) dan atau penambahan energi dalam (U). (Sutini Pujiastuti Lestari, 2011).

2.4.2 Hukum Termodinamika II

Hukum kedua termodinamika II dinyatakan dengan entropi. Pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi bahwa entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan.

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi. Entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi kompleks, rumit, dan sulit diprediksi.

2.5 *Steam*

Uap atau *steam* merupakan gas yang dihasilkan dari proses yang disebut penguapan. Bahan baku yang digunakan untuk menghasilkan *steam* adalah air bersih. Air dari *water treatment* yang telah diproses dialirkan menggunakan pompa ke *feed water drum* hingga pada *level* yang telah ditentukan. Dengan meningkatnya suhu dan air telah mendekati kondisi didihnya, maka beberapa molekul mendapatkan temperatur yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuat sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang di atas permukaan, sebelum jatuh kembali ke cairan.

Dengan mempertimbangkan struktur molekul cairan dan uap, dapat diambil kesimpulan bahwa densitas *steam* lebih kecil dari air, sebab molekul *steam* terpisah jauh satu dengan yang lainnya. Jika jumlah molekul yang meninggalkan permukaan cairan lebih besar dari yang masuk kembali, maka air akan menguap dengan bebas. Pada keadaan ini air telah mencapai titik didihnya atau suhu jenuhnya, yang dijenuhkan oleh temperatur panas. Pada tekanan atmosfer suhu jenuh air adalah 100°C , tetapi jika tekanannya bertambah maka temperatur penambahan lebih banyak panas dan suhu mengalami peningkatan tanpa perubahan fase. Oleh karena itu, kenaikan tekanan secara efektif akan meningkatkan entalpi air dan suhu jenuhnya.

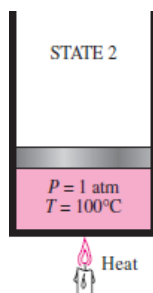
Jika *steam* mengalir dari *boiler*, pada kecepatan yang sama dengan yang dihasilkan kemudian penambahan panas lebih lanjut akan meningkatkan laju produksinya. Jika *steam* yang sama tertahan tidak meninggalkan *boiler*, dan jumlah panas yang masuk dijaga tetap, maka energi yang mengalir ke *boiler* akan lebih besar daripada energi yang mengalir keluar. Energi berlebih ini akan menaikkan tekanan, yang pada akhirnya akan menyebabkan suhu jenuhnya meningkat.

Gas hasil pembakaran yang mengandung energi panas akan terus mengalir mengikuti bentuk *boiler* hingga ke sisi keluaran. Di sepanjang perjalanan, panas yang terkandung di dalam gas buang akan diserap oleh permukaan *tubing boiler* dan diteruskan secara konduksi ke air di dalam pipa. Secara bertahap, air akan berubah fase menjadi uap basah (*saturated steam*) dan dapat berlanjut hingga menjadi uap kering (*superheated steam*).

2.5.1 *Saturated Steam* dan *Superheated Steam*

- Cair jenuh (*Saturation Liquid*)

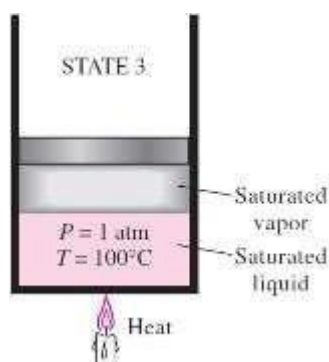
Dengan semakin bertambahnya jumlah kalor yang dimasukkan kedalam silinder maka temperatur akan naik hingga mencapai 100°C . Pada titik ini air masih dalam fase cair, tetapi sedikit saja ada penambahan kalor maka sebagian dari air tersebut akan berubah menjadi uap. Kondisi ini disebut dengan cair jenuh (*saturation liquid*) seperti digambarkan pada Gambar 4 (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 2.3 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. Kondisi ini dapat digambarkan pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 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 6. Sedangkan jika sedikit saja terjadi pengurangan kalor maka akan menyebabkan uap terkondensasi (Cengel dan Boles, 1994).



Gambar 2.5 Uap Jenuh (*Saturated Vapor*)
(Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

- Uap Panas Lanjut (*Superheated Vapor*)

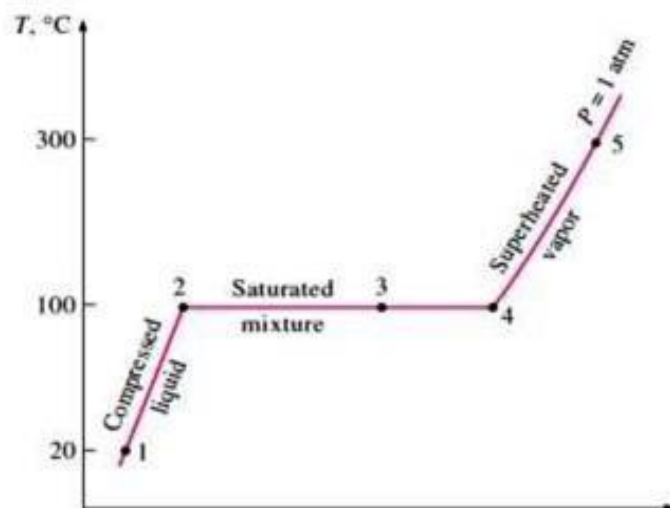
Setelah fluida didalam silinder dalam kondisi uap jenuh maka jika kalor kembali ditambahkan dan tekanan dijaga konstan pada 1 atm, temperatur uap akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Kondisi tersebut dinamakan uap panas lanjut (*superheated vapor*) karena temperatur uap didalam silinder diatas temperatur saturasi dari uap pada tekanan 1 atm yaitu 100°C.



Gambar 2.6. 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 2.7



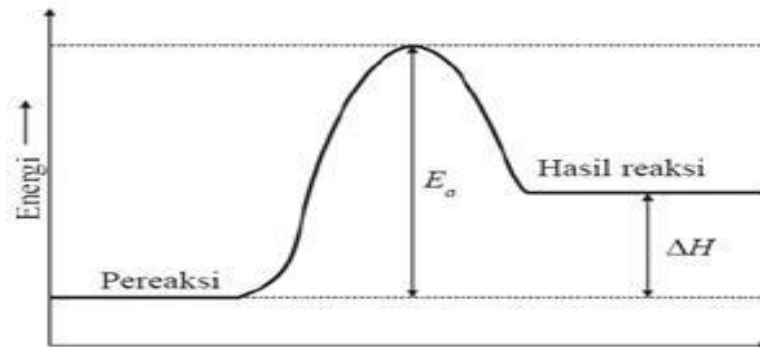
Gambar 2.7. Diagram T-v Pemanasan Air pada Tekanan Konstan
(Sumber: Yunus A. Cengel dan Michael A. Boles, 1994)

2.6 Entalpi

Entalpi adalah jumlah dari semua energi sistem yang besarnya pada kondisi tekanan tetap dipengaruhi oleh aliran kalor yang masuk/keluar sistem. Entalpi dinyatakan dengan huruf H, dengan satuan Joule. Entalpi akan tetap/konstan selama tidak ada energi yang masuk atau keluar sistem. Besarnya entalpi tidak dapat ditentukan, yang dapat ditentukan adalah perubahan entalpinya (ΔH).

Jika suatu reaksi berlangsung pada tekanan tetap, maka perubahan entalpinya sama dengan kalor yang harus dipindahkan dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya ($\Delta H = q$). Perubahan entalpi dapat ditentukan dengan menghitung selisih antara entalpi produk (H_{produk}) dengan entalpi reaktan (H_{reaktan}). maka dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta H = H_{Produk} - H_{Reaktan}$$



Gambar 2.8 Diagram entalpi perubahan fasa

Beberapa jenis perubahan entalpi sebagai berikut:

1. Perubahan Entalpi Pembentukan Standar (ΔH_f°), perubahan entalpi pada pembentukan 1 mol senyawa menjadi unsur - unsurnya pada keadaan standar.
2. Perubahan Entalpi Penguraian Standar (ΔH_d°), perubahan entalpi pada penguraian 1 mol senyawa menjadi unsur - unsurnya pada keadaan standar.
3. Perubahan Entalpi Pembakaran Standar (ΔH_c°), perubahan entalpi pada pembakaran sempurna 1 mol senyawa atau unsur pada keadaan standar.
4. Perubahan Entalpi Pelarutan Standar (ΔH_s°), perubahan entalpi pada pelarutan 1 mol senyawa menjadi larutan encer.

2.7 Efisiensi Termal Boiler

Efisiensi adalah unjuk kerja suatu kemampuan alat utilitas. Disamping itu, definisi efisiensi *boiler* adalah tingkat kemampuan kerja boiler atau ketel uap yang didapat melalui perbandingan antara energi yang berpindah tempat atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar. Air merupakan fluida kerja *boiler* yang memiliki kombinasi antara sistem- sistem peralatan yang dipakai untuk terjadinya perpindahan panas radiasi dan konveksi energi termal gas-gas hasil pembakaran (Asmudi, 2010).

Berikut ini adalah faktor untuk memahami perhitungan efisiensi *boiler* :

a. *Temperatur Stack*

Temperatur *stack* adalah temperatur gas pembakaran yang meninggalkan *boiler* (Noviyanto, 2014). *Stack* digunakan untuk membuang gas buang pembakaran yang sudah tidak dapat terpakai kembali. Temperatur *stack* adalah salah satu faktor yang dapat mempengaruhi efisiensi *boiler* secara tinggi.

b. Kandungan panas dari bahan bakar

Kandungan panas bahan bakar adalah karbon untuk rasio hidrogen, apakah panas laten (panas yang dibutuhkan untuk mengubah air menjadi uap) ataupun bukan (Noviyanto, 2014). Bahan bakar memiliki nilai kalor yang dapat mempengaruhi efisiensi. Kandungan panas yang ada di dalamnya apabila tidak diperhatikan akan terbuang dan otomatis peluang adanya kehilangan kalor semakin besar.

c. *Excess Air*

Kandungan udara berlebih pada boiler diyakini menimbulkan efek yang tidak baik bagi efisiensi *boiler*. Udara berlebih diatur dengan cara mengendalikan kandungan O₂ dengan melalui proses *trimming*.

d. Kerugian yang diakibatkan karena *temperature ambient* atau lingkungan. Temperatur lingkungan sangat berperan dalam proses operasi *boiler* karena *boiler* bergantung pada tinggi rendahnya *temperature*, sedangkan faktor tersebut dipengaruhi oleh cuaca disekitar ruangan *boiler*.

e. Kerugian akibat radiasi dan konveksi.

Kehilangan kalor yang disebabkan karena radiasi dan konveksi dapat mengurangi kehilangan kalor dalam jumlah banyak. Dalam hal ini, permukaan-permukaan material pendukung *boiler* harus dalam keadaan layak operasi, supaya tidak mengganggu proses selama *boiler* beroperasi yang akan menyebabkan kehilangan kalor semakin banyak. Sebuah *boiler* dengan *shell* terisolasi akan memiliki suhu permukaan yang lebih rendah, dan memiliki kerugian yang lebih banyak karena lebih rendah permukaannya (Noviyanto, 2014). Apabila jumlah kerugian panas yang disebabkan karena radiasi dan konveksi tidak dapat dihindari, dampaknya akan meluas. Semua komponen akan terjadi kerusakan dan tidak dapat menghantarkan panas secara sempurna yang dengan demikian akan sangat mengurangi efisiensi *boiler*.

Berdasarkan *standart ASME power test code* terdapat 2 metode dalam menghitung efisiensi *boiler*, yaitu metode *direct* dan metode *indirect*. Metode *direct* atau input-output adalah metode yang menggunakan perbandingan besar energi panas yang keluar dengan energi panas yang masuk ke dalam *boiler*. Besar energi masuk berasal dari nilai kalori LPG dan jumlah bahan bakar, nilai kalori dicari dengan mengambil beberapa sampel kemudian melakukan penelitian di laboratorium. Sedangkan besar energi yang keluar besar dari jumlah *steam* yang dihasilkan, *entalpi steam* dan *feed water*.

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{\text{heat absorbed by working fluid}}{\text{Energy Input}} \times 100\%$$

Kemudian, metode *indirect* adalah metode yang menggunakan selisih antara besar energi input dan *losses*. Metode ini biasanya disebut metode *heat losses*.

$$\eta = \frac{\text{fuel energy input} - \text{energy losses}}{\text{fuel energy input}} \times 100\%$$

Kemudian, perhitungan efisiensi termal berdasarkan buku Hogen adalah sebagai berikut :

$$\eta_{\text{Boiler}} = (\text{Entalpi steam} / \text{HHV LPG}) \times 100\%$$

2.8 Specific Fuel Consumption (SFC)

Beberapa faktor yang mempengaruhi kebutuhan bahan bakar *boiler* adalah nilai kalori bahan bakar, dimana semakin tinggi nilai kalori, maka semakin sedikit bahan bakar yang digunakan. Nilai kebutuhan bahan bakar *boiler* digunakan sebagai referensi terhadap suatu perusahaan dalam meningkatkan efisiensi proses pengolahan. Dalam mencari nilai kebutuhan bahan bakar *boiler* harus diketahui terlebih dahulu nilai kalori bahan bakar yang digunakan. Konsumsi spesifik bahan bakar merupakan jumlah *steam* yang dapat dihasilkan oleh banyaknya bahan bakar dalam menghasilkan *steam* per kg/kj. Konsumsi Spesifik Bahan Bakar dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut: (Cahyo Adi Basuki, 2011).

$$\text{SFC} = \text{Massa steam} / \text{Massa bahan bakar (hg-hf)}$$

2.9 Air Umpan Boiler

Air umpan boiler adalah air yang disuplai ke *boiler* untuk diubah menjadi steam yang biasa disebut dengan ‘‘Air Demin’’, sedangkan sistem air umpan adalah sistem penyediaan air secara otomatis untuk *boiler* sesuai dengan kebutuhan *steam*.

Ada dua sumber air umpan *boiler* yaitu :

1. Kondensat : *Steam* yang telah berubah fasa menjadi air (mengembun)
2. Air make up : Air baku yang sudah diolah

Boiler merupakan suatu pembangkit panas yang sangat penting, oleh sebab itu adalah penting untuk menjaga kualitas air yang diumpankan untuk *boiler*, karena akan berhubungan dengan efisiensi dari *boiler* tersebut. Memproduksi *steam* yang berkualitas tergantung pada pengolahan air yang benar untuk mengendalikan kemurnian *steam*, endapan dan korosi. Sebuah *boiler* merupakan bagian dari sistem *boiler* yang menerima semua bahan pencemar dari sistem di depannya. Kinerja *boiler*, efisiensi dan umur *boiler* merupakan hasil langsung dari pemilihan dan pengendalian air umpan yang digunakan dalam *boiler*. Jika air umpan masuk *boiler*, kenaikan suhu dan tekanan menyebabkan komponen air memiliki sifat yang berbeda. Hampir semua komponen dalam air umpan dalam keadaan terlarut. Walau demikian dibawah kondisi panas dan tekanan hampir seluruh komponen terlarut keluar dari larutan sebagai padatan partikulat, kadang-kadang dalam bentuk kristal dan pada waktu yang lain dalam bentuk amorph. Jika kelarutan komponen spesifik dalam air terlewati, maka akan terjadi pembentukan kerak dan endapan. Air *boiler* harus cukup bebas dari pembentukan endapan padat supaya terjadi perpindahan panas yang cepat dan efisien dan harus tidak korosif terhadap logam *boiler*.

Persyaratan air umpan *boiler* :

1. Air tidak boleh membentuk kerak / endapan yang membahayakan

Kerak/deposit pada air umpan disebabkan oleh terbentuknya endapan dari air langsung pada permukaan perpindahan panas atau oleh suspensi air yang menempel pada permukaan logam menjadi keras atau lengket. Pembentukan kerak menyebabkan kesadahan dan suhu tinggi, yang biasanya berupa garam-garam karbonat dan silikat.

2. Air bebas dari zat-zat yang dapat menyebabkan korosi

Korosi adalah kerusakan – kerusakan yang timbul pada logam yang disebabkan karena terjadinya reaksi kimia antara permukaan logam dengan media sekelilingnya. Korosi di dalam peralatan air pengisi dapat diterangkan dengan *theory electrochemical* yang mempercepat terjadinya korosi di dalam ketel uap terutama :

- *Oxygen* yang terlarut
- Asam-asam
- Endapan yang dipermukaan, terutama yang mempunyai sifat *electronegative* terhadap baja.
- Gabungan logam yang tak disukai, seperti tembaga dan baja.
- Adanya *electrolytes*, seperti larutan garam-garam kuat.

Ada 4 cara yang umum digunakan untuk mencegah korosi, ialah:

- Menghilangkan gas-gas yang terlarut di dalam air pengisi, terutama *oxygen* dan *carbon dioxide* yang terlarut dalam air. Hal ini dapat diatasi dengan proses aerasi.
- Penetralkan asam-asam dan mempertahankan *alkalinity* yang diinginkan dan pH didalam air pengisi serta air ketel.
- Pembersihan mesin secara berkala.
- Meniadakan konsentrasi garam yang berlebihan.

Macam-macam korosi diantaranya adalah :

- a. Korosi oleh suhu tinggi.
- b. Korosi karena kelelahan.

3. Air tidak boleh mengakibatkan terjadinya *carry over*

Carry over yang besar dihasilkan dari *priming dan foaming*. *Foaming* dapat digambarkan sebagai pembentukan sejumlah buih di dalam ketel, yang disebabkan oleh kesalahan gelembung-gelembung uap untuk bersatu dan pecah. Hal ini disertai oleh kenaikan kandungan uap air yang agak banyak di dalam uap yang dikeluarkan oleh ketel. *Priming* adalah ditandai oleh sejumlah besar air yang keluar dari ketel bersama-sama dengan uap, umumnya dalam letupan-letupan yang tidak *continue (intermittent)* yang membahayakan pipa-pipa uap, turbin dan mesin-mesin.

Hal ini dapat terjadi secara bersama-sama dengan *foaming*. Untuk menghilangkan gangguan-gangguan ini, penting untuk menyelidiki setiap air yang akan digunakan sebagai pengisi ketel dan menentukan setiap sifat dari air dan menentukan cara terbaik untuk pengolahannya. Air umpan *boiler* harus memenuhi persyaratan tertentu seperti yang diuraikan dalam tabel di bawah ini :

Tabel 2.2 Syarat air umpan *boiler*

Parameter	Satuan	Pengendalian Batas
Ph	Unit	10.5 – 11.5
Conductivity	$\mu\text{mhos/cm}$	5000, max
TDS	Ppm	3500, max
P – Alkalinity	Ppm	-
M – Alkalinity	Ppm	800, max
O – Alkalinity	Ppm	2.5 x SiO ₂ , min
T. Hardness	Ppm	-
Silica	Ppm	150, max
Besi	Ppm	2, max
Phosphat residual	Ppm	20 – 50
Sulfite residual	Ppm	20 – 50
pH condensate	Unit	8.0 – 9.0

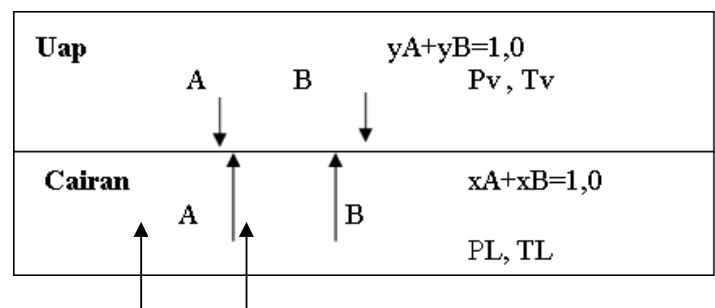
Pengolahan Air Umpan Boiler :

Air umpan *boiler* atau *Boiler Feed Water* nantinya akan dipanaskan hingga menjadi *steam*. Karena di dalam *boiler* terjadi pemanasan harus diwaspadai adanya kandungan-kandungan mineral seperti ion Ca²⁺ dan Mg²⁺. Air yang banyak mengandung ion Ca²⁺ dan Mg²⁺ disebut sebagai air yang sadah (*hard water*). Ion-ion ini sangat berpengaruh pada kualitas air yang nantinya akan digunakan sebagai umpan *boiler*. Biasanya ion-ion ini terlarut dalam air sebagai garam karbonat, sulfat, bikarbonat dan klorida. Berbeda dengan senyawa-senyawa kimia lainnya, kelarutan dari senyawa-senyawa mengandung unsur Ca dan Mg seperti CaCO₃, CaSO₄, MgCO₃, Mg(OH)₂, CaCl₂, MgCl₂, akan memiliki kelarutan yang makin kecil / rendah

apabila suhu makin tinggi. Sehingga ketika memasuki *boiler*, air ini merupakan masalah yang harus segera diatasi. Air yang sadah ini akan menimbulkan kerak (*scalling*) dan tentu saja akan mengurangi efisiensi dari *boiler* itu sendiri akibat dari hilangnya panas akibat adanya kerak tersebut. Selain itu yang dikhawatirkan bisa menyebabkan *scalling* adalah adanya deposit silika. Dalam hal ini akan terjadi perbedaan ketika mengolah air untuk dijadikan sebagai air minum dibandingkan dengan untuk umpan *boiler*. Dalam pengolahan air minum mineral- mineral yang ada dalam air tidak akan dihilangkan karena mineral-mineral tersebut dibutuhkan untuk tubuh manusia. Bahkan ada perusahaan air minum yang menambahkan mineral pada air minum produksinya. Hal itu tidak boleh terjadi dalam pengolahan air untuk umpan *boiler*.

2.10 Keseimbangan Uap-Cair

Ditinjau sistem kontak uap dan cair campuran A dan B :



A. Konsep Keseimbangan

x =fraksi mol difase cair

y =fraksi mol difase uap.

Pada keadaan seimbang (equilibrium, ideal, teoritis), tidak ada perubahan T , P , dan fraksi-fraksi dalam sistem, dan akan tercapai:

1. Kestimbangan termal = perpindahan panas netto=0, atau tidak ada *driving fore* perpindahan panas ($\Delta T=0$).

maka: $T_v = T_L$ T_v =suhu uap, T_L =Suhu cairan.

2. Kestimbangan mekanis =Kestimbangan semua gaya-gaya: $P_v = P_L$

3. Kestimbangan potensi kimia:

ΔG sistem \rightarrow minimum.

$(\mu_i)_V = (\mu_i)_L$

Dari persamaan ini akan diperoleh hubungan antara komposisi di fase uap dan di fase cairan

\rightarrow **Bidang termodinamika.**

b. Bentuk dan sumber data keseimbangan uap-cair

Campuran biner:

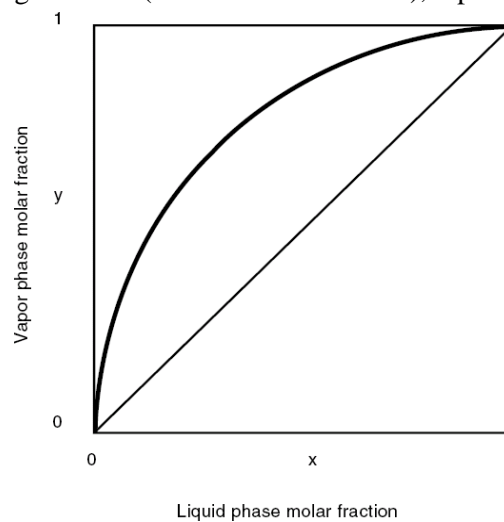
1. disajikan dlm tabel Y-X-T (pada P tertentu)

contoh: tabel 2.3 (Perry, 6 th ed. hal.13-11).

TABLE 13-1 Constant-Pressure Liquid-Vapor Equilibrium Data for Selected Binary Systems (Continued)

Component		Temperature, °C	Mole fraction A in		Total pressure, kPa
A	B		Liquid	Vapor	
		70.4	0.820	0.615	
		72.7	0.905	0.725	
		76.9	0.984	0.937	
Ethanol	Water	95.5	0.0190	0.1700	101.3
		89.0	0.0721	0.3891	
		86.7	0.0966	0.4375	
		85.3	0.1238	0.4704	
		84.1	0.1661	0.5089	
		82.7	0.2337	0.5445	
		82.3	0.2608	0.5580	
		81.5	0.3273	0.5826	
		80.7	0.3965	0.6122	
		79.8	0.5079	0.6564	
		79.7	0.5198	0.6599	
		79.3	0.5732	0.6841	
		78.74	0.6763	0.7385	
		78.41	0.7472	0.7815	
		78.15	0.8943	0.8943	
Ethyl acetate	Ethanol	78.3	0.0	0.0	101.3
		76.6	0.050	0.102	
		75.5	0.100	0.187	
		73.9	0.200	0.305	
		72.8	0.300	0.389	
		72.1	0.400	0.457	
		71.8	0.500	0.516	
		71.8	0.540	0.540	
		71.9	0.600	0.576	
		72.2	0.700	0.644	
		73.0	0.800	0.726	
		74.7	0.900	0.837	
		76.0	0.950	0.914	
		77.1	1.000	1.000	

2. disajikan dalam diagram Y-X (kurva McCabe-Thiele), diplot dari data tabel



3. disajikan dlm diagram T-komposisi atau T-(X;Y) X dan Y adalah fraksi mol komponen yang lebih volatil.

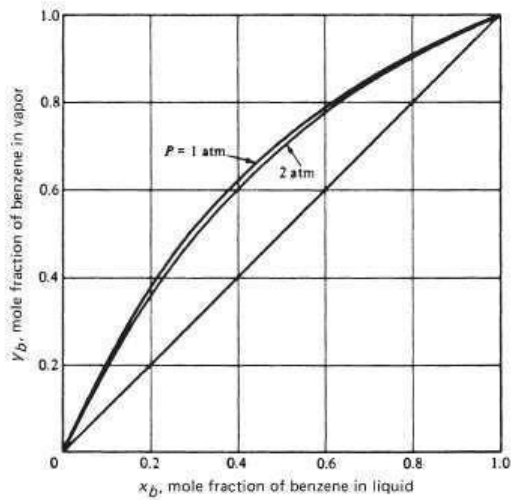


FIG. 13-8 Isobaric y - x curves for benzene-toluene. (Brian, *Staged Cascades in Chemical Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972.)

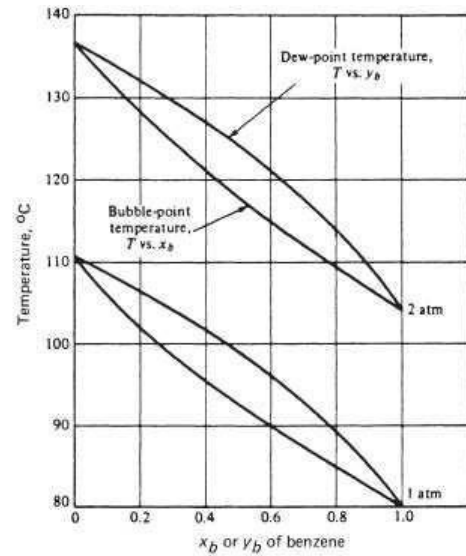


FIG. 13-9 Isobaric vapor-liquid equilibrium data for benzene-toluene. (Brian, *Staged Cascades in Chemical Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972.)

Keseimbangan uap-cair adalah kondisi dimana liquid dan gasnya berada pada kesetimbangan satu sama lain, kondisi dimana kecepatan evaporasi sama dengan kecepatan kondensasi pada level molekuler. Suatu substansi yang berada pada kesetimbangan uap-cair umumnya disebut fluida jenuh. Untuk spesies kimia murni, hal ini sama dengan kondisi spesies pada titik didihnya.