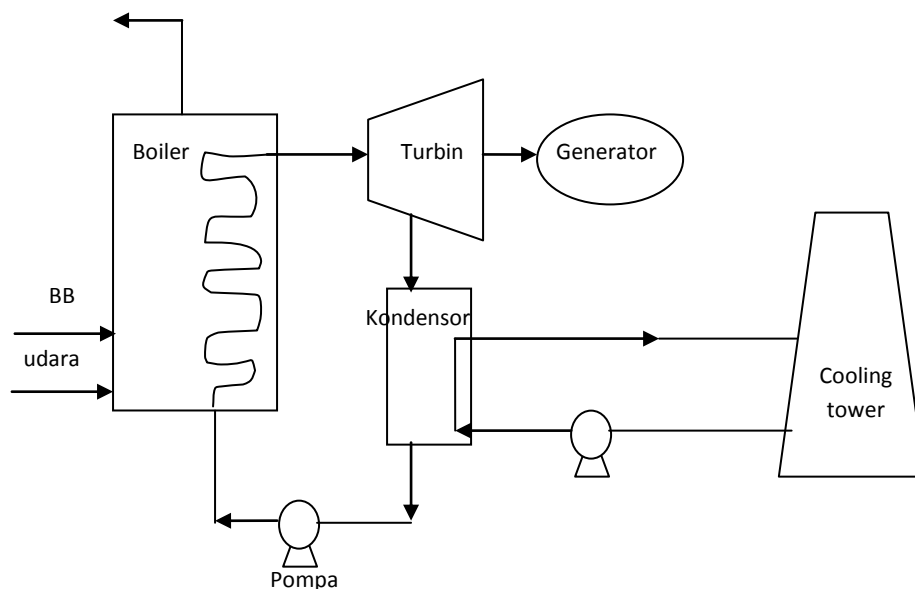


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengendalikan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk start awal. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Sistem kerja PLTU menggunakan bahan bakar minyak residu/MFO (soalr) dan gas alam. Kelebihan dari PLTU adalah daya yang dihasilkan sangat besar. Konsumsi energi pada peralatan PLTU bersumber dari putaran turbin uap. PLTU

adalah suatu pembangkit yang menggunakan uap sebagai penggerak utama (*prime mover*). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. PLTU merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan proses sudu-sudu turbin menggerakkan poros turbin, untuk selanjutnya poros turbin menggerakkan generator yang kemudian dibangkitkannya energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan akan menyuplai alat-alat yang disebut beban.

### **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*.

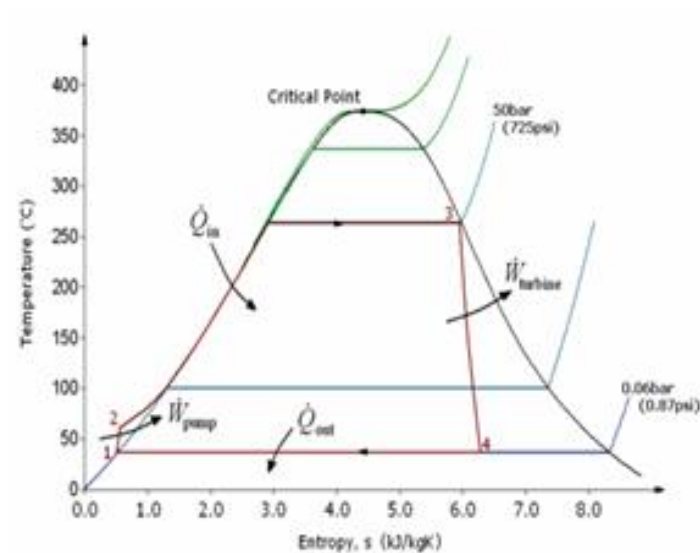
Pada *tube*, air dipanasi berbentuk uap air. Uap air ini dikumpulkan kembali pada *steam drum*, kemudian dipanaskan lebih lanjut pada *superheater* sudah berubah menjadi uap kering yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi, dan selanjutnya uap ini digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, 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. Berikut ini adalah gambar diagram siklus ranike



Gambar 2. Siklus Rankine Ideal

1-2 : Merupakan proses kompresi isentropik dalam kompresor, kondisi 1 adalah udara atmosfer. Temperatur udara hasil kompresi  $T_2$  dapat diketahui dari persamaan :

$$T^2 = T^1 \cdot rp \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

Keterangan:

$rp$  = rasio tekanan

$\gamma$  = Perbandingan panas spesifik pada tekanan konstan dan panas spesifik pada volume konstan, untuk udara.

2-3 : Proses penambahan panas pada tekanan konstan dalam ruang bakar.

Panas yang ditambahkan dalam ruang bakar adalah :

$$Q_{in} = C_p (T_3 - T_2)$$

3-4 : Proses ekspansi isentropik dalam turbin. Temperatur gas keluaran dihitung melalui persamaan :

$$T_4 = T_3 \left( \frac{1}{RP} \right)^{\gamma-1/\gamma}$$

4-1 : Merupakan proses pelepasan kalor (*heat rejection*) ke lingkungan pada tekanan konstan. Hal ini dapat dihitung melalui persamaan :

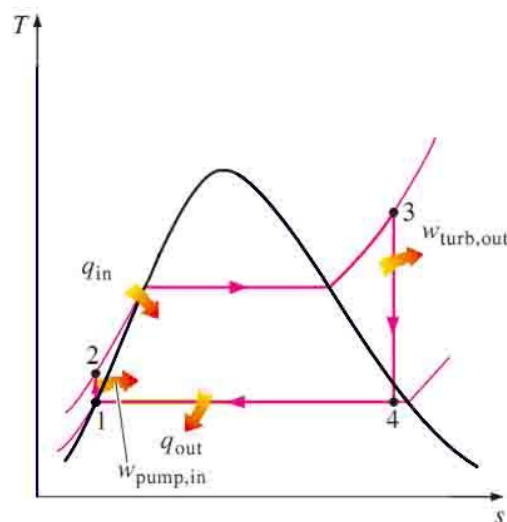
$$Q_c = (h_4 - h_1)$$

### Siklus Rankin Ideal

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus rankine. Siklus rankine berbeda dengan siklus – siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal.

Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus carnot dapat dicapai pada daerah uap basah, perubahan entalpi fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperature. Temperature hanya diatur oleh tekanan uap fluida.

Kerja pompa pada siklus rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus carnot. Siklus rankine ideal dapat digambarkan dalam diagram T-S dan H-S seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 3. Siklus rankine sederhana

Siklus rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

1-2 kompresi isentropic dengan pompa.

2-3 penambahan panas dalam boiler secara isobar

3-4 ekspansi isentropic pada turbin

4-1 pelepasan panas pada condenser secara isobar dan isothermal

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi samapi tekanan operasi boiler. Temperature air akan meningkat selama kompresi isentropic karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki boiler sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh boiler ke air pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang dihasilkan steam ini disebut sebagai steam generator. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memauki turbin untuk diekspansi secara isentropic dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperature dari steam akan turun selama proses ini menuju keadan 4 steam akan masuk kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. Stem ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam condenser dan akan meninggalkan kondensor sebagai cair jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

## 2.2 Boiler

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

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

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

1. Ruang bakar 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.

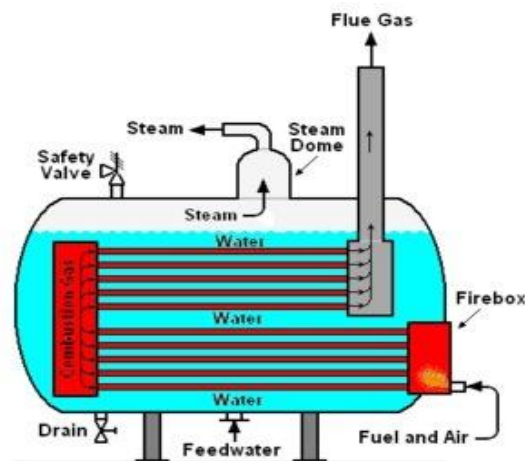
Boiler pada dasarnya terdiri dari bumbungan (drum) yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Banyak orang mengklasifikasikan ketel uap tergantung kepada sudut pandang masing-masing (Muin 1988 : 8).

### **Jenis-Jenis Boiler**

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

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

Pada fire tube boiler, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam shell untuk dirubah menjadi steam. Fire tube boilers biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, fire tube boilers kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. Fire tube boilers dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar fire tube boilers dikonstruksi sebagai “paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



Gambar 4. *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:

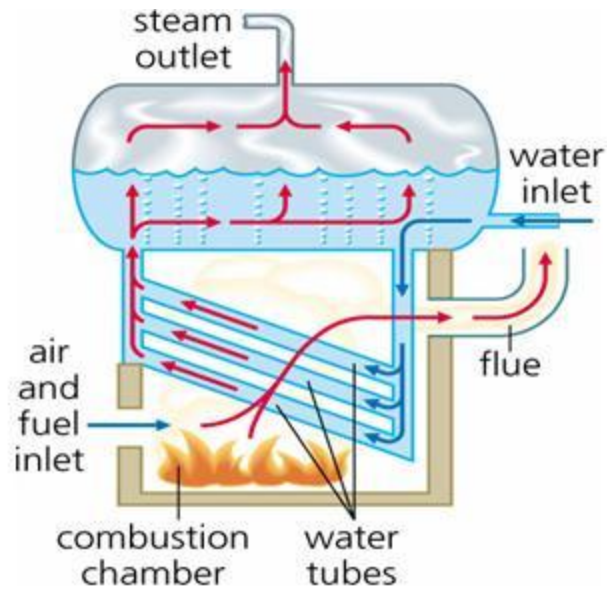
- a. Kapasitas yang digunakan.
- b. Kondisi uap yang dibutuhkan.
- c. Bahan bakar yang dibutuhkan.
- d. Konstruksi yang sederhana.

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

Pada water tube boiler, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga. Water tube boiler yang sangat modern dirancang dengan kapasitas steam antara 4.500 – 12.000 kg/jam, dengan tekanan sangat tinggi. Banyak water tube boilers yang dikonstruksi secara paket jika digunakan bahan bakar minyak bakar dan gas.

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

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

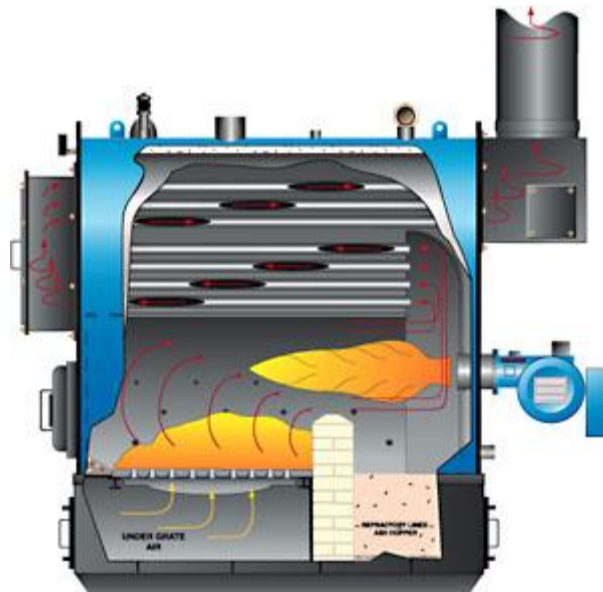


Gambar 5. *Water Tube Boiler* (Boiler Pipa Air)

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

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

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



Gambar 6. *Packaged Boiler* (Paket Boiler)

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

### 2.3 Super Heater

Superheater merupakan alat yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut (*superheat vapour*). Uap panas lanjut bila digunakan untuk melakukan kerja dengan jalan ekspansi di dalam turbin atau mesin uap tidak akan mengembun, sehingga mengurangi kemungkinan timbulnya bahaya yang disebabkan terjadinya pukulan balik atau *back stroke* yang diakibatkan mengembunnya uap belum pada waktunya sehingga menimbulkan vakum di tempat yang tidak semestinya di daerah ekspansi. Superheater ditempatkan pada daerah aliran gas asap yang bertemperatur tinggi.

Temperatur uap yang dihasilkan superheater sangat dipengaruhi temperatur gas asap. Perbedaan temperatur yang terkecil antara dua aliran gas asap dengan uap disebut dengan titik penyempitan (*pinch point*) a-x dan b-y (gambar 3) minimum 20 °C.

Boiler superheater memproduksi *superheated steam* atau kering. Uap air ini menyimpan lebih banyak energi panas daripada uap air *saturated* (uap air basah), ditandai dengan nilai entalpi yang lebih tinggi. Uap air yang diproduksi oleh boiler konvensional umumnya hanya mencapai fase *saturated*, dan pada boiler superheater uap air *saturated* ini akan dipanaskan lebih lanjut mencapai fase *superheated*. Selain menyimpan energi panas yang lebih besar, uap air superheater juga menghilangkan sifat basah dari uap *saturated* sehingga tidak akan terjadi kondensasi yang terlalu cepat di dalam mesin yang menggunakan uap air tersebut.

Keuntungan utama menggunakan boiler superheater dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan air, namun di sisi lain ada biaya tambahan yang diperlukan untuk perawatan yang lebih besar. Tanpa adanya perawatan yang baik pada boiler superheater, resiko keselamatan sangat mungkin terjadi. Karena boiler superheater bekerja pada tekanan dan temperatur yang tinggi, sangat berbahaya bila terjadi kerusakan pipa pada boiler tersebut.

### **2.3.1 Perinsip Kerja Super Heater**

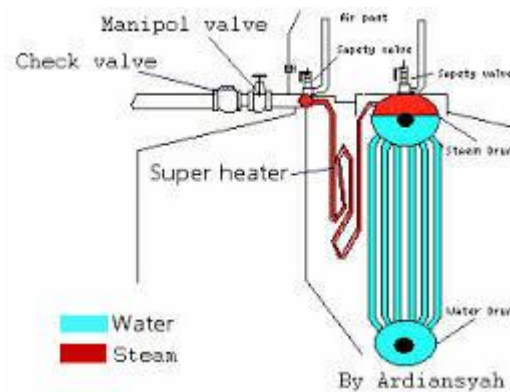
Prinsip kerja Super Heater yaitu pada saat pemanasan, api harus diatur sehingga suhu dari pipa Super Heater tidak melebihi batas keamanan yang diizinkan. Suhu dari logam pipa pada waktu pemanasan ketel biasanya dijaga supaya berada di bawah suhu pipa pada saat ketel berada pada kapasitas penuh. Hal ini dapat dilaksanakan dengan mengatur waktu dari saat pemanasan sampai saat tekanan kerja tercapai, dengan maksud untuk membatasi suhu gas masuk ke superheater pada  $\pm 500^{\circ}\text{C}$  untuk superheater dengan pipa baja biasa.

Superheater yang tidak dilengkapi dengan pembuangan atau drain akan selalu menyimpan air condensate pada saat pembakaran dihentikan. Makin banyak condensate yang terkumpul disitu, makin banyak pula panas yang dibutuhkan untuk mendidihkan air dalam pipa superheater, supaya pipa superheater bebas dari air. Pada saat pemanasan pertama, biasanya membutuhkan waktu yang lama untuk membersihkan pipa superheater dari air, karena banyak air yang terjebak di pipa superheater sesudah diadakan hydrostatis test.

Cara termudah untuk membuang air tersebut adalah dengan menguapkannya. Cara ini mengakibatkan kontrol dari suhu gas selama penaikan tekana menjadi sangat penting, untuk mencegah panas berlebihan pada pipa yang tidak dilalui oleh uap karena terhambat oleh air. Hal tersebut juga mengharuskan pembukaan penuh katup pelepas (air vent) pada superheater sebelum pemanasan ketel dimulai, dan katub haruslah tetap terbuka sampai dicapai aliran uap dari ketel pada pipa utama  $\pm 10\%$  dari kapasitas ketel.

Hal yang menjadi catatan penting adalah bahwa ada uap mengalir melalui vent tidaklah berarti bahwa semua pipa superheater telah dilalui uap, beberapa kemungkinan masih mengandung air yang terjebak di dalamnya dan bila pemanasan berlangsung cepat, pada saat itu pipa dapat mengalami panas berlebihan (pada bagian permukaan air yang terjebak) karena tidak ada aliran uap didalamnya.

Saat penghentian operasi dai ketel katub pelepas superheater harus dibuka sebelum menutup katub uap utama dan juga pada setiap saat dimana dimana uap yang melewati katub utama lebih kecil dari 10% dari kapasitas ketel, seperti yang sudah tersebut diatas. Kemungkinan pipa superheater mengalami panas berlebihan pada saat katub uap ditutup bila ketel masih sangat panas, yaitu pada saat baru berhenti ketel masih mengandung banyak bagasse atau abu panas diatas fire grate yang masih dapat terbakar.



Gambar 7. Ilustrasi Super Heater

### 2.3.2 Rankine Cycle Dengan Superheater

Untuk mempertinggi efisiensi dipakai superheating. Uap sesudah keluar dari boiler dengan temperature  $T_2$  dipanaskan kembali dengan superheater hingga temperature  $T_3$ . Maka

$$Q_2 = h_d - h_a$$

Demikian juga panas  $Q_1$  dibuang sepanjang lintasan ef dengan proses isobaric, maka:

$$Q_1 = h_e - h_f$$

Kerja output per pound uap,

$$W_{out} = h_d - h_e$$

Kerja pompa

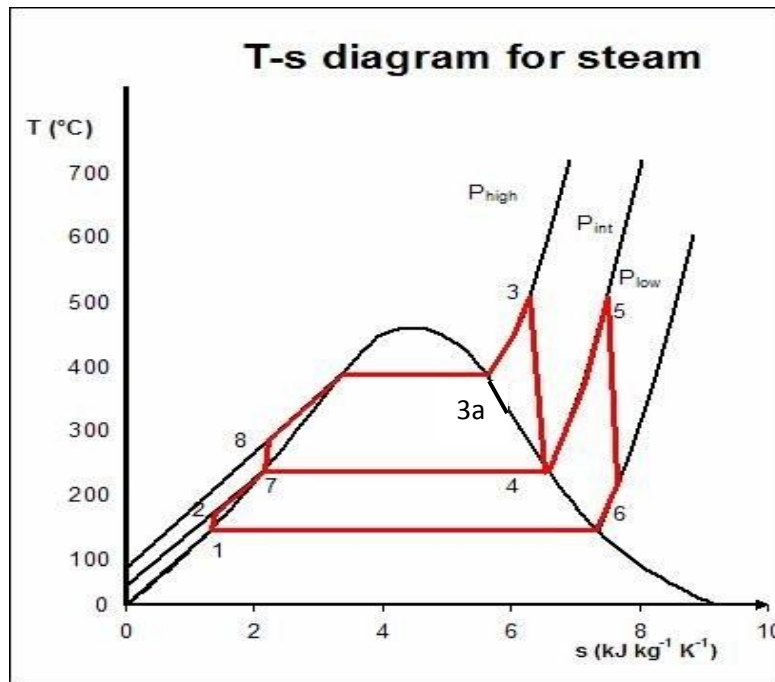
$$W_{in} = h_a - h_f$$

Efisiensi termis

$$\eta_{th} = \frac{W_{out} - w_{in}}{Q_2}$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2}$$

Superheater dilakukan dengan memanaskan uap jenuh sampai suatu suhu tertentu (biasanya sampai  $1000^\circ\text{F}$ ). sedangkan reheater dengan memanaskan kembali kondisi superheater. Siklus ini dapat dilihat pada gambar 8 sebagai berikut:



Gambar 8 : Diagram S-T Siklus Rankine Dengan Superheater Dan Reheater

Keterangan :

3a – 3 uap jenuh dipanaskan ( superheated)

3 – 4 uap superheater diekspansikan pada turbin uap

4-5 uap sisa dipanaskan kembali

5-5 uap superheated diekspansikan pada turbin

Efisiensi siklus dapat dicari dengan mencari harga enthalpy masing – masing titik

$$\text{Panas masuk} = (h_3 - h_1) + (h_5 - h_4)$$

$$\text{Panas keluar} = h_6 - h_7$$

$$\text{Kerja keluar} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

$$\text{Kerja masuk} = h_1 - h_7$$

$$\eta = \frac{\text{kerja keluar} - \text{kerja masuk}}{\text{panas keluar}}$$

ekspansi 3 -4 biasanya dikerjakan pada turbin tekanan tinggi, sedangkan ekspansi 5-6 dilakukan pada turbin tekanan rendah. Suhu superheater dan reheater yang umum dilakukan sampai 1000°F.

## 2.4 Proses Pembakaran

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

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

a. T-Temperatur

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

b. T-Turbulensi

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

c. T-Time (Waktu)

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

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

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

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

(1) Neutral combustion,

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

## (2) Oxidizing combustion,

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

## 2.5 Macam Perpindahan Panas

### Proses Perpindahan Panas

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

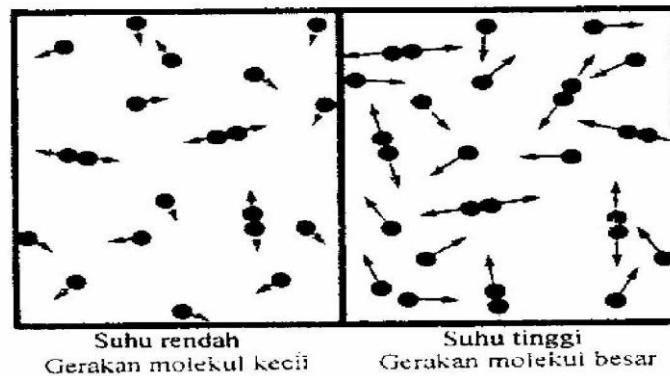
1. Perpindahan panas secara konduksi
2. Perpindahan panas secara konveksi
3. Perpindahan panas secara radiasi

#### 1) Perpindahan Panas secara Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana molekul-molekul dari zat perantara tidak ikut berpindah tempat tetapi molekul-molekul tersebut hanya menghantarkan panas atau proses perpindahan panas dari suhu yang tinggi ke bagian lain yang suhunya lebih rendah.

#### Konduksi ( keadaan *steady* )

Suatu material bahan yang mempunyai *gradient*, maka kalor akan mengalir tanpa disertai oleh suatu gerakan zat. Aliran kalor seperti ini disebut konduksi atau hantaran. Konduksi *thermal* pada logam - logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi *thermal* mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul [McCabe,1993]



Gambar 9 Pergerakan molekul yang sama dengan suhu beda

Contoh perpindahan kalor secara konduksi antara lain: perpindahan kalor pada logam cerek pemasak air atau batang logam pada dinding tungku. Laju perpindahan kalor secara konduksi sebanding dengan gradien suhu perpindahan kalor secara konduksi sebanding dengan gradient suhu [McCabe,1993].

$$\frac{q}{a} \sim \frac{\delta T}{\delta x}$$

dan dengan konstanta kesetimbangan ( konduksi ) maka menjadi persamaan *Fourier*

$$q = -k A \cdot \frac{\delta T}{\delta x}$$

dimana;

$q$  = laju perpindahan kalor

$\frac{\delta T}{\delta x}$  = gradient suhu kearah perpindahan kalor

$k$  = konduktivitas termal

$A$  = luas permukaan bidang hantaran

Tanda (-) digunakan untuk memenuhi hukum II Termodinamika yaitu “ Kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur “ [Holman,1986].

## 2) Perpindahan Panas secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi dari satu tempat ke tempat lain dengan gerakan partikel secara fisis. Perpindahan panas secara konveksi ini juga diakibatkan oleh molekul-molekul zat perantara

ikut bergerak mengalir dalam perambatan panas atau proses perpindahan panas dari satu titik ke titik lain dalam fluida antara campuran fluida dengan bagian lain.

Arus fluida yang melintas pada suatu permukaan, maka akan ikut terbawa sejumlah enthalpi. Aliran enthalpi ini disebut aliran konveksi kalor atau konveksi. Konveksi merupakan suatu fenomena makroskopik dan hanya berlangsung bila ada gaya yang bekerja pada partikel atau ada arus fluida yang dapat membuat gerakan melawan gaya gesek [McCabe,1993] . Contoh sederhana perpindahan panas secara konveksi adalah aliran air yang dipanaskan dalam belanga.

Kalor yang dipindahkan secara konveksi dinyatakan dengan persamaan *Newton* tentang pendinginan [Holman , 1986 ].

$q = - h \cdot A \cdot \delta T$  dimana :

$q$  = Kalor yang dipindahkan

$h$  = Koefisien perpindahan kalor secara konveksi

$A$  = Luas bidang permukaan perpindahan panas

$T$  = Temperatur

Tanda minus ( - ) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif ( + ). Berdasarkan gaya penyebab terjadinya arus aliran fluida, konveksi dapat diklasifikasikan:

#### Konveksi Bebas (*Natural Convection*)

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

#### a. 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.

Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi ( diteruskan ), refleksi ( dipantulkan ), dan absorpsi ( diserap ) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, sebagai contoh memantulkan sebagian besar radiasi yang jatuh padanya, sedangkan permukaan yang berwarna hitam dan tidak mengkilap akan menyerap radiasi yang diterima dan diubah menjadi kalor. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari. Menurut hukum *Stefan Boltzmann* tentang radiasi panas dan berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan ( dari benda hitam ) dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat temperatur absolut benda itu dan berbanding langsung dengan luas permukaan benda [ **Artono Koestoer,2002** ].

$$q \text{ pancaran} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

dimana :

$\sigma$  = konstanta proporsionalitas ( tetapan *Stefan boltzmann* )

$$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

A = luas permukaan bidang benda hitam

T = temperatur absolut benda hitam

#### 2.4.1 **Kebutuhan Udara Pembakaran**

Dalam suatu proses pembakaran bahan bakar dengan oksigen, dibutuhkan oksigen murni untuk proses pembakaran didalam ruang bakar. Namun hal ini merupakan hal yang tidak efisien karena harga oksigen murni yang sangat mahal, selain itu dapat mengakibatkan suhu lokal yang sangat tinggi di dalam ruang

bakar sehingga dapat merusak pipa-pipa dan logam pembungkus boiler. Namun hal ini dapat diatasi dengan menggunakan oksigen yang cukup banyak tersedia yaitu udara. Jika mengabaikan kandungan kecil dari gas-gas mulia yang ada di dalam udara seperti neon, xenon, dan sebagainya, maka dapat menganggap udara kering sebagai campuran dari gas nitrogen dan oksigen. Proporsi oksigen dan nitrogen dapat diatur dalam udara, dalam satuan volume maupun satuan berat. Dalam bentuk persentase, proporsinya adalah :

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

Berdasarkan volume : Oksigen 21 %  
Nitrogen = 79 %

#### 2.4.2 Kebutuhan Udara Teoritis

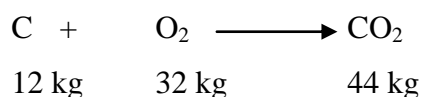
Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara :

- a. Berdasarkan pada satuan berat
- b. Berdasarkan pada satuan volume

Pada suatu analisis pembakaran selalu diperlukan data-data berat molekul dan berat atom dari unsur-unsur yang terkandung dalam bahan bakar.

##### a. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat

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



Ini berarti bahwa setiap kg karbon memerlukan 32 kg oksigen secara teoritis untuk membakar sempurna karbon menjadi karbondioksida. Apabila oksigen yang dibutuhkan untuk membakar masing-masing unsur pokok dalam bahan bakar dihitung lalu dijumlahkan, maka akan ditemukan kebutuhan oksigen teoritis yang dibutuhkan untuk membakar sempurna seluruh bahan

bakar. Oleh karena itu untuk memperoleh harga kebutuhan oksigen teoritis yang sebenarnya maka dibutuhkan oksigen yang telah dihitung berdasarkan persamaan reaksi pembakaran kemudian dikurangi dengan oksigen yang terkandung dalam bahan bakar.

b. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

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

## 2.6 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 :

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

## 2.7. Solar dan LPG Sebagai Bahan Bakar

### a. Solar

Bahan bakar solar adalah bahan bakar minyak hasil sulingan dari minyak bumi mentah, bahan bakar ini umumnya berwarna coklat yang jernih (Pertamina, 2005). Penggunaan solar umumnya adalah untuk bahan bakar pada semua jenis mesin diesel dengan putaran tinggi (diatas 1000 rpm), yang juga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam dapur-dapur kecil yang terutama diinginkan pembakaran yang bersih. Minyak solar ini biasa juga disebut *Gas Oil, Automotive Diesel Oil, High Speed Diesel* (Pertamina, 2005). Bahan bakar solar mempunyai sifat-sifat utama yaitu

- a. Warna sedikit kekuningan dan berbau
- b. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
- c. Mempunyai titik nyala yang tinggi (40 °C sampai 100°C)
- d. Terbakar secara spontan pada suhu 350°C
- e. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
- f. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
- g. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.



Adapun spesifikasi bahan bakar solar adalah sebagai berikut :

Tabel 1. 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

c. LPG (*liquefied petroleum gas*)

*LPG (liquified petroleum gas)* 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 ( $C_5H_{12}$ ).

Dalam kondisi atmosfer, elpiji akan berbentuk gas. Volume elpiji dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu elpiji dipasarkan berbentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung elpiji tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1.

Tabel 2. Spesifik bahan bakar LPG (liquid petroleum gas)

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

Sumber : Pertamina 2005

Menurut spesifikasinya, elpiji dibagi menjadi tiga jenis yaitu elpiji campuran, elpiji propana dan elpiji butana. Spesifikasi masing-masing elpiji tercantum dalam keputusan Direktur Jendral Minyak dan Gas Bumi Nomor: 25K/36/DDJM/1990. Elpiji yang dipasarkan Pertamina adalah elpiji campuran.

## 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. Mengenai sifat-sifat dari udara dapat dilihat pada Tabel 3. dibawah ini.

Tabel 3. Sifat-sifat Udara

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

Sumber : Perry's Chemical Engineering Hand's Book, 1996

Sifat kimia udara adalah sebagai berikut :

- 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 pembusakan terhadap air boiler. Oleh karena itu untuk dapat digunakan sebagai air umpan maka air baku dari sumber air harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu, karena harus memenuhi persyaratan tertentu seperti tabel dibawah ini :

Tabel 4. Persyaratan Air Umpan Boiler

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

### Kualitas Uap

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

- Dalam jumlah yang benar untuk menjamin bahwa aliran panas yang memadai tersedia untuk perpindahan panas
- Pada suhu dan tekanan yang benar, atau akan mempengaruhi kinerja
- Bebas dari udara dan gas yang dapat mengembun yang dapat menghambat perpindahan panas
- Bersih, karena kerak (misal karat atau endapan karbonat) atau kotoran dapat meningkatkan laju erosi pada lengkungan pipa dan *orifice* kecil dari *steam traps* dan katup

- e. Kering, dengan adanya tetesan air dalam steam akan menurunkan entalpi penguapan aktual, dan juga akan mengakibatkan pembentukan kerak pada dinding pipa dan permukaan perpindahan panas.

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