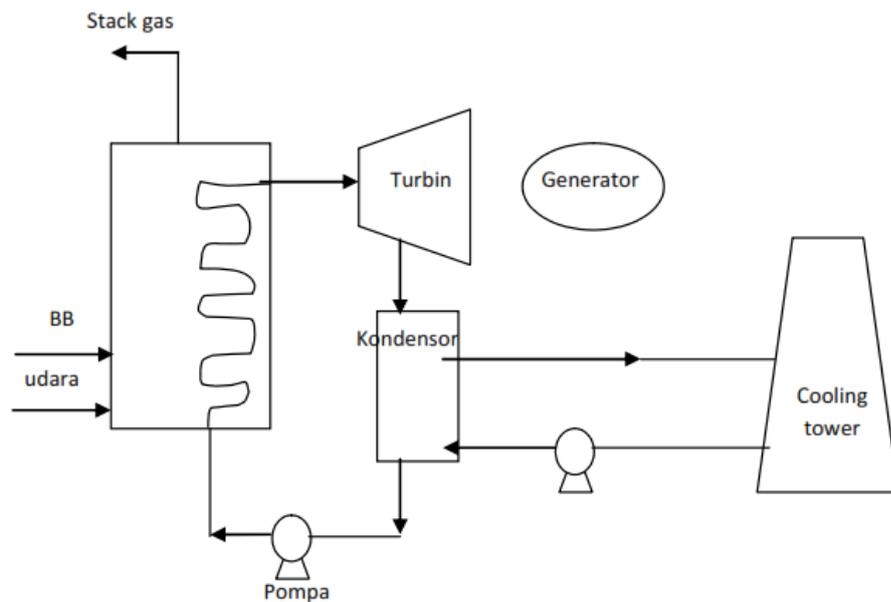


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

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



Gambar 1. Komponen-komponen pembangkit listrik tenaga uap

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

### 2.1.1 Prinsip Kerja PLTU

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

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

## 2.2 Siklus Termodinamika

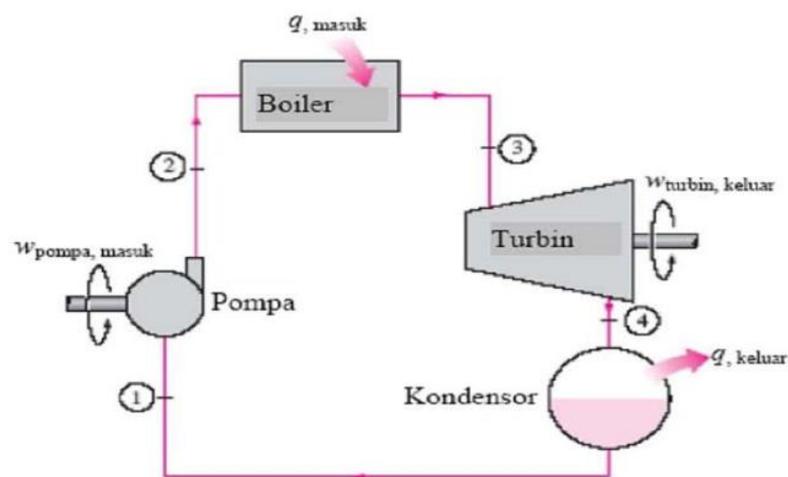
Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya

menggunakan air sebagai fluida yang bergerak. Siklus ini menghasilkan 80% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan di seluruh dunia. Siklus ini dinamai untuk mengenang ilmuwan Skotlandia, William John Maquorn Rankine.

Siklus Rankine adalah model operasi mesin uap panas yang secara umum ditemukan di pembangkit listrik. Sumber panas yang utama untuk siklus Rankine adalah batu bara, gas alam, minyak bumi, nuklir, dan panas matahari.

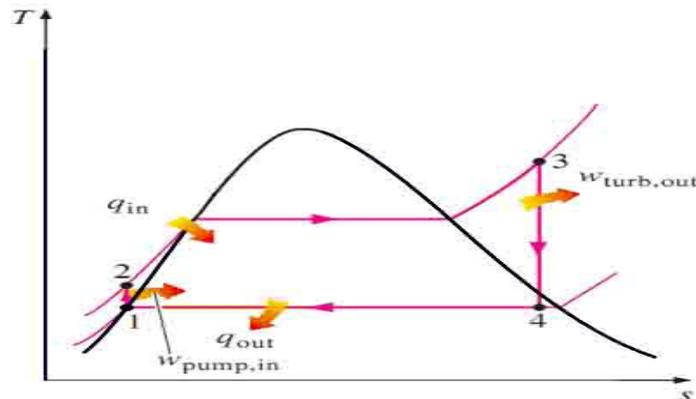
Siklus Rankine kadang-kadang diaplikasikan sebagai siklus Carnot, terutama dalam menghitung efisiensi. Perbedaannya hanyalah siklus ini menggunakan fluida yang bertekanan, bukan gas. Efisiensi siklus Rankine biasanya dibatasi oleh fluidanya. Tanpa tekanan yang mengarah pada keadaan super kritis, range temperatur akan cukup kecil. Uap memasuki turbin pada temperatur  $565^{\circ}\text{C}$  (batas ketahanan *stainless steel*) dan kondenser bertemperatur sekitar  $30^{\circ}\text{C}$ . Hal ini memberikan efisiensi Carnot secara teoritis sebesar 63%, namun kenyataannya efisiensi pada pembangkit listrik tenaga batu bara sebesar 42%.

Fluida pada Siklus Rankine mengikuti aliran tertutup dan digunakan secara konstan. Berbagai jenis fluida dapat digunakan pada siklus ini, namun air dipilih karena berbagai karakteristik fisika dan kimia, seperti tidak beracun, terdapat dalam jumlah besar, dan murah.



Gambar 2. Bagan Sederhana Siklus Rankine

Sumber : Cengel, 2017



Gambar 3. Diagram T-s Siklus Rankine

Sumber : Cengel, 2017

Siklus Rankine ideal tidak melibatkan irreversibel internal dan terdiri dari 4 tahapan proses :

- 1 – 2 merupakan proses kompresi isentropik dengan pompa
- 2 – 3 Penambahan panas dalam boiler pada  $P = \text{konstan}$
- 3 – 4 Ekspansi isentropik ke dalam turbin
- 4 – 1 Pelepasan panas di dalam kondensor pada  $P = \text{konstan}$

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi sampai tekanan operasi *boiler*. Temperatur air akan meningkat selama kompresi isentropik ini melalui sedikit pengurangan dari volume spesifik air. Jarak vertikal antara 1–2 pada T–s diagram ini biasanya diletakkan untuk lebih amannya proses. Air memasuki *boiler* sebagai cairan terkompresi pada kondisi 2 dan akan menjadi uap superheated pada kondisi 3.

Dimana panas diberikan oleh *boiler* ke air pada T tetap. *Boiler* dan seluruh bagian yang menghasilkan steam ini disebut sebagai *steam generator*. Uap superheated pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropik dan akan menghasilkan kerja untuk memutar *shaft* yang terhubung dengan generator listrik sehingga dihasilkanlah listrik.

P dan T dari *steam* akan turun selama proses ini menuju keadaan 4 dimana *steam* akan masuk kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada P konstan di dalam kondensor dan akan meninggalkan kondensor sebagai cairan jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus

ini. Area dibawah kurva proses 2–3 menunjukkan panas yang ditransfer ke *boiler*, dan area dibawah kurva proses 4–1 menunjukkan panas yang dilepaskan di kondenser. Perbedaan dari kedua aliran ini adalah kerja netto yang dihasilkan selama siklus.

### 2.3 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 bahanbakar 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).

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

### 2.3.1 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.

### 2.3.2 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*:

#### 1. 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 make-up (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang *boiler* dan *plant* proses.

#### 2. 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.

#### 3. 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*).

#### 4. 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.

#### 5. Panas Hilang Awal Operasi

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

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

Untuk sistem kerja yang menggunakan satu atau dua gilir tenaga kerja, energi yang dibutuhkan untuk *star up* umumnya dianggap sebagai panas yang hilang, karena pada malam hari panas ini biasanya hilang begitu saja.

Waktu yang dibutuhkan untuk *star up* berkisar antara 5 menit sampai 2 jam.

6. 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.

7. 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.

8. Efisiensi Pembakaran dan Kelebihan Udara

Pada *boiler* listrik, semua energi yang disuplay diteruskan ke air, tetapi pada ketel uap bahan bakar 20% atau lebih dari energi yang diberikan bahan bakar terbuang melalui gas buang *boiler* (*flue gas*). Sayangnya, gas buang ini merupakan suatu ketentuan dasar tercapainya pembakaran yang baik. Umumnya diperlukan suplay udara yang berlebih, sekitar 10% untuk gas, 20% untuk bahan bakar minyak dan 40% bahan bakar padat guna mencapai pembakaran bahan bakar yang komplit. Dan hal ini diukur sebagai persentase CO<sub>2</sub> didalam gas buang. Efisiensi maksimum harus dicapai dengan suhu minimum gas buang sekitar 200-250°C, suhu yang selalu diatas titik embun, guna mengurangi terjadinya korosi.

### 2.3.3 Klasifikasi *Boiler*

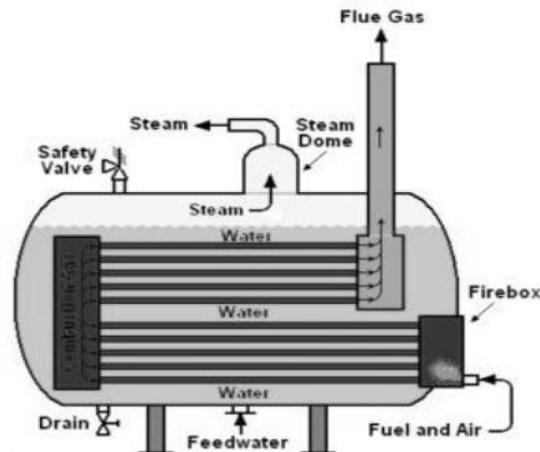
Berbagai bentuk *boiler* telah berkembang mengikuti kemajuan teknologi dan evaluasi dari produk-produk *boiler* sebelumnya yang dipengaruhi oleh gas buang *boiler* yang mempengaruhi lingkungan dan produk *steam* seperti apa yang akan dihasilkan. Berikut adalah beberapa macam klasifikasi *Boiler* :

1. Berdasarkan Fluida yang menegalir dalam pipa
  - a. Ketel pipa api (*fire tube boiler*)

Pada ketel pipa api seperti tampak pada Gambar 4. gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan ketel ada didalam *shell* untuk dirubah menjadi *steam*. Ketel pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relatif kecil dengan tekanan steam rendah dan sedang. Sebagai pedoman, ketel pipa api kompetitif untuk kecepatan steam sampai 14.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. Ketel pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam 6 operasi. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar ketel pipa api dikonstruksi sebagai “paket” *boiler* (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



Gambar 4. Ketel Pipa Api (Omnical)  
 Sumber : Murni, *Buku ajar ketel uap*, 2012



Gambar 5. *Fire Tube Boiler* (Boiler Pipa Api)

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

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

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

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

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

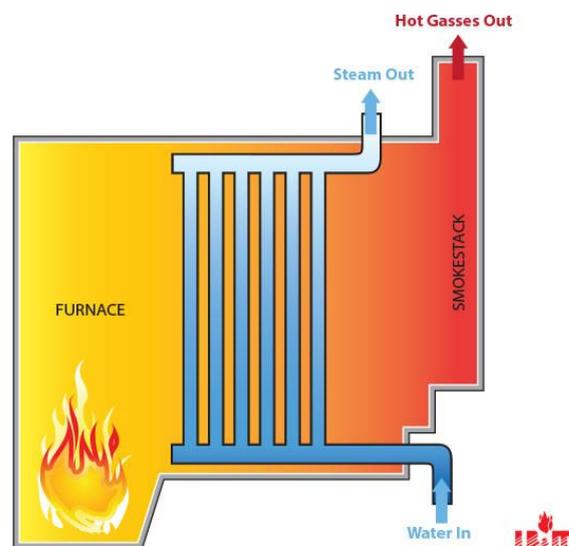
- a. Kapasitas yang digunakan

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

b. Ketel pipa air (*water tube boiler*)

Pada Ketel pipa air seperti tampak pada Gambar 6. air umpan *boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam *drum*. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk *steam* pada daerah uap dalam drum. Ketel ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus ketel untuk pembangkit tenaga listrik. Untuk ketel pipa air yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket. Karakteristik ketel pipa air sebagai berikut:

1. *Force, induce, dan balance draft* membantu untuk meningkatkan efisiensi
2. Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari pengolahan air
3. Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.



Gambar 6. Ketel Pipa Air (YourDitionary.com)  
 Sumber: Murni, *Buku ajar ketel uap*, 2012

2. Berdasarkan Pemakaiannya
  - a. Ketel Stasioner (*Stasionary boiler*) atau ketel tetap

Merupakan ketel-ketel yang didudukan di atas fundasi yang tetap, seperti ketel untuk pembangkit tenaga, untuk industri dan lain-lain sebagainya.

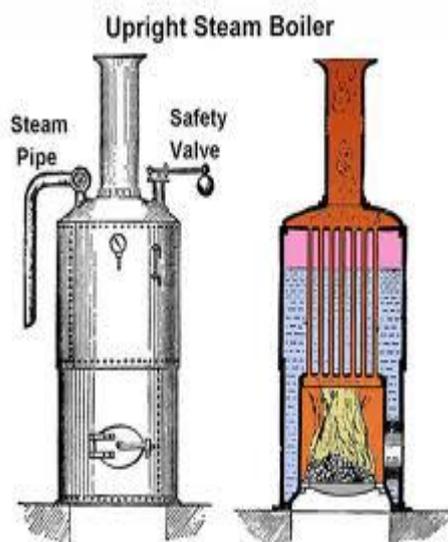
b. Ketel pindah atau *portable boiler*.

Merupakan ketel yang dipasang fundasi yang berpindah-pindah (mobil), seperti *boiler* lokomotif, lokomobil, dan ketel panjang serta lain yang sebagainya termasuk ketel kapal (*marine Boiler*).

3. Berdasarkan pada Poros Tutup Drum (*Shell*)

a. Ketel Tegak

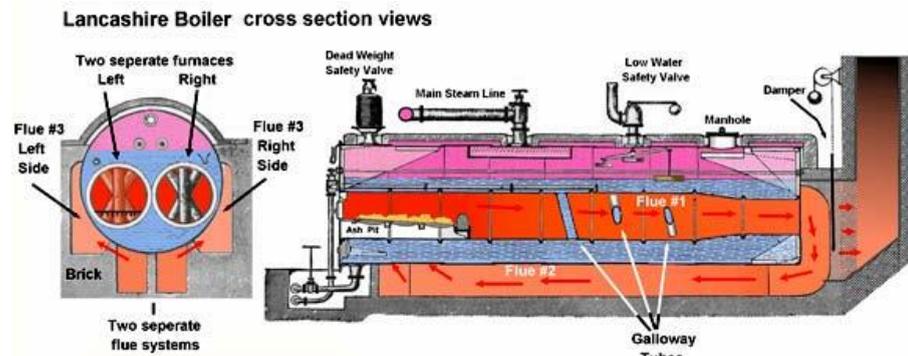
Ketel Tegak seperti tampak pada Gambar 7. (*vertical steam boiler*) adapun contoh ketel tegak adalah ketel Cocharn, Ketel Clarkson dan lain-lainnya.



Gambar 7. Ketel Tegak (UNEP)  
Sumber : Murni, Buku ajar ketel uap, 2012

b. Ketel mendatar (*horizontal steam Boiler*)

Adapun yang termasuk jenis ketel ini adalah ketel Cornish, Lancashire (tampak pada Gambar 8), Scotch dan lain-lain.



Gambar 8. Ketel Mendatar (*Lancashire*)

Sumber : Murni, *Buku ajar ketel uap, 2012*'

4. Berdasarkan bentuk dan letak pipa
  - a. Ketel dengan pipa lurus, bengkok dan terlekak-lekuk (*straight, bent and sinous tubuler heating surface*).
  - b. Ketel dengan pipa miring datar dan miring tegak (*horizontal, inclined or vertical tubuler heating surface*).
  
5. Berdasarkan tekanan kerjanya
  - a. Ketel peredaran alami (*Natural circulation steam boiler*)  
 Merupakan *boiler* dengan peredaran air didalam ketel terjadi secara alami yaitu air yang ringan naik, sedangkan air yang berat turun, sehingga terjadi aliran konveksi alami. Umumnya ketel beroperasi secara aliran alami, seperti ketel *Lancashire, Babcock & Wilcox* dan lain-lain.
  - b. Ketel peredaran paksa (*Force circulation steam boiler*)  
 Merupakan *Boiler* dengan aliran paksa, aliran paksa diperoleh dari pompa sentrifugal yang digerakan secara electric motor, misalnya system aliran paksa pada ketel-ketel bertekanan tinggi misalnya *La-mont Boiler, Benson Boiler, Loeffler Boiler* dan *Velcan Boiler*.
  
6. Berdasarkan Kapasitas
  - a. Tekanan kerja rendah :  $\leq 5$  atm.
  - b. Tekanan kerja sedang :  $> 5-40$  atm .
  - c. Tekanan kerja tinggi :  $> 40-80$  atm.
  - d. Tekanan kerja sangat tinggi :  $> 80$  atm.

7. Berdasarkan pada sumber panasnya
  - a. Ketel uap dengan bahan bakar alami.
  - b. Ketel uap dengan bahan bakar buatan
  - c. Ketel uap dengan dapur listrik.
  - d. Ketel uap dengan energi nuklir.

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi kerja ketel uap (*boiler*) adalah sebagai berikut :

- a. Faktor laju udara bersih yang disuplai melewati *air heater*, *Boiler* harus diopersaikan dengan laju aliran udara lebih dari kebutuhan udara teoritis yang dihitung berdasarkan analisa gas asap. Tetapi udara berlebih yang terlalu banyak juga akan mengakibatkan terjadinya losses karena pengambilan panas sendiri oleh udara berlebih untuk dibawa bersama gas buang, untuk itulah dilakukan analisa gas asap untuk menentukan kebutuhan udara aktual.
- b. Temperatur udara pembakaran juga merupakan faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler*, temperatur udara pembakaran dapat dinaikkan dengan memanfaatkan temperatur gas buang (*flue gas*) yang tinggi dengan menggunakan alat pemanas udara (*air heater*).
- c. *Fouling* merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kerja *boiler*, *Fouling* adalah terjadinya deposit atau kerak pada permukaan perpindahan panas yang dapat menghambat perpindahan panas yang terjadi pada *boiler*. Sehingga efisiensi *boilernya* akan menurun dan temperatur gas buangnya akan semakin tinggi.
- d. Faktor *burner*, fungsi dari burner ini adalah untuk mencampur bahan bakar dan udara dengan proporsi yang sesuai untuk terjadinya penyalaan api dan untuk menjaga kondisi pembakaran yang terus menerus berjalan dengan baik. *Burner* yang tidak diatur dengan baik akan mengakibatkan pencampuran bahan bakar dengan udara sesuai dan pada setiap laju pembebanan akan meningkatkan kebutuhan udara berlebih dan memboroskan pemakaian bahan bakar sehingga efisiensi *boiler* akan turun.
- e. *Blowdown* juga berpengaruh terhadap efisiensi *boiler*. Endapan yang terjadi

di dinding *tube* pada sisi air dapat mengurangi efisiensi *boiler* dan bahkan kerak dapat merusak *tube* karena *over heating*. Endapan endapan tersebut disebabkan oleh tingginya konsentrasi *suspended solids* dan *dissolved solids*, hal ini juga dapat menyebabkan terbentuknya busa (*foam*) sehingga menyebabkan *carry over*. Oleh karena itu konsentrasi *solids* harus tetap dijaga pada kondisi tertentu. Proses *blowdown* adalah dimana air dibuang keluar dan segera digantikan oleh air umpan *boiler*. Pada proses *blowdown* ini air yang dikeluarkan dalam keadaan temperatur tinggi, maka hal ini merupakan pembuangan panas yang mengakibatkan penurunan efisiensi.

#### 2.3.4 Komponen-komponen *Boiler*

*Boiler* terdiri dari beberapa ruangan yang memiliki fungsi yang berbeda-beda, yaitu :

1. *Main equipment*

- a. Ruang Bakar (*Furnance*)

Ruang bakar adalah bagian dari *boiler* yang berfungsi untuk tempat berlangsungnya proses pembakaran bahan bakar dan udara. Tekanan gas panas yang berada di dalam ruang bakar (*furnace*) dapat lebih besar dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar positif) dan dapat juga bertekanan lebih kecil dari pada tekanan udara luar (tekanan ruang bakar negatif) atau bertekanan seimbang (*balance draft*). Temperatur ruang bakar dapat mencapai 1300°C, namun khususnya di PLTU unit sektor belawan hal ini tidak akan terjadi karena apabila bila hal ini terjadi maka akan menyebabkan pemuaiian pipa yang berlebihan dan dapat mengakibatkan pecahnya *tube wall* di ruang bakar.



Gambar 9. Ruang Bakar  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

b. *Burner* (alat pembakaran)

*Burner* adalah alat yang dipakai untuk menyemburkan bahan bakar ke dalam ruang bakar dan menghasilkan pengabutan yang memudahkan reaksi pembakaran. Pada PLTU pembangkitan sektor belawan, PLTU unit 1/2 jenis *burner* yang digunakan adalah jenis *burner* minyak, dan PLTU unit 3/4 telah dilengkapi *nozzle* gas sehingga dapat menggunakan bahan bakar minyak maupun natural gas. Dan terdapat 3 tingkat *burner* pada masing-masing unit PLTU. *Burner-burner* tersebut dilengkapi oleh *igniter* sebagai pemantik api agar bahan bakar dan udara yang masuk ke ruang bakar dapat terbakar. Jenis bahan bakar utama yang digunakan pada unit PLTU pembangkitan sektor belawan adalah *Marine Fuel Oil* atau *Heavy Fuel Oil* (HFO). Namun pada start awal PLTU jenis bahan bakar yang digunakan adalah HSD atau sering disebut *Light Fuel Oil* (LFO). Sebelum bahan bakar dibakar di dalam ruang bakar terlebih dahulu bahan bakar dipanaskan di *Fuel Oil Heater* (FOH) hingga temperature 120°C agar memudahkan proses pengabutan bahan bakar. Selain daripada itu untuk menyempurnakan proses pengabutan bahan bakar digunakan *steam atomizing* dengan temperatur sekitar 220°C dengan tekanan sekitar 10 Bar.



Gambar 10. *Burner*  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

c. *Superheater*

*Superheater* adalah peralatan yang berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh sampai menjadi uap panas lanjut sesuai dengan kebutuhan untuk menggerakkan *turbine*. Karena uap yang terbentuk dari pemanasan didalam pipa-pipa di ruang bakar berada dalam wujud jenuh atau basah maka uap yang demikian jika digunakan atau diekspansi dalam *turbine*, akan menimbulkan pengembunan yang cepat. *Superheater* dibedakan atas 2 jenis yaitu:

- *Low Temperature Superheater ( LTS )*

Uap jenuh dari *steam drum* dialirkan ke *primary superheater* atau *low temperature superheater*. *Low Temperature Superheater (LTS)* menghasilkan uap dengan temperature 426°C. Uap yang keluar dari LTS kemudian dialirkan ke *High Temperature Superheater* untuk dipanaskan kembali menjadi uap panas lanjut. Uap dari LTS juga digunakan untuk *steam atomizing* yang membantu proses pengabutan bahan bakar agar bahan bakar dapat terbakar sempurna.

- *High Temperature Superheater*

Uap hasil pemanasan LTS selanjutnya mengalir ke *High Temperature Superheater(HTS)* yang terletak pada bagian gas sangat panas. Sebagian dari HTS terletak tepat diatas ruang bakar, oleh karena itu transfer panas yang diperoleh oleh HTS adalah secara radiasi dan konveksi. Kemudian uap panas yang diperoleh dari HTS mengalir ke *turbine*.

d. *Economizer*

*Economizer* merupakan salah satu peralatan yang meningkatkan efisiensi *boiler* karena memanfaatkan kalor yang terkandung dalam *flue gas* sebelum terbang ke atmosfer melalui *stack*. Dengan kata lain dengan adanya ekonomiser maka unit PLTU telah menghemat konsumsi bahan bakar. *Economizer* terdiri dari pipa-pipa air yang ditempatkan pada lintasan gas asap sebelum meninggalkan *boiler*. *Transfer* panas yang terjadi pada *economizer* adalah secara konveksi. Artinya *flue gas* memberikan panas pada pipa-pipa *economizer* sehingga temperatur air yang ada di dalam pipa-pipa naik dari 180°C sampai 250°C. Pipa-pipa *economizer* terbuat dari bahan baja yang sanggup menahan panas dan tekanan tinggi. Pada pipa-pipa *economizer* sering sekali terjadi kerusakan. Beberapa penyebab kerusakan yang sering terjadi pada pipa-pipa *economizer* adalah *acid attack*, *shorttherm overheat*, *mechanical fatigue*, *slagging*, *scalling*. Apabila temperatur *flue gas* melalui *economizer* terlalu tinggi maka dapat terjadi *overheat* pada pipa-pipa *economizer* yang mengakibatkan pipa *economizer* pecah. Dan apabila temperatur *flue gas* melalui *economizer* terlalu rendah maka dapat terjadi *slagging* yang mengakibatkan pipa *economizer* bocor akibat diferensial temperatur. Kerusakan pipa *economizer* pada bagian dalam pipa (sisi air) dapat dihindarkan dengan jalan melunakkan air pengisi terlebih dahulu, dan kerusakan pipa *economizer* pada bagian luar pipa (sisi gas asap) diatasi dengan mempertahankan temperatur *flue gas* diatas titik embun gas sulfur dan melakukan *soot blowing* secara berkala.



Gambar 11. *Economizer*  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

e. *Boiler Drum*

*Boiler drum* adalah bejana tempat menampung air yang datang dari *economizer* dan uap hasil penguapan dari *tube wall*. Kira-kira setengah dari *drum* berisi air dan setengahnya lagi berisi uap. *Boiler drum* terbuat dari plat baja dilas dan dilengkapi diantaranya:

- *Man hole*
- Saluran menuju *superheater*
- Saluran menuju *feedwater inlet*
- Saluran menuju *blowdown*
- Saluran menuju *downcomer*
- Saluran menuju *safety valve*
- Pipa injeksi bahan kimia
- Pipa *sample taking*
- Pipa menuju alat ukur dan *control*.

Pengaturan level di dalam *boiler drum* dilakukan dengan mengatur besarnya pembukaan *flow control valve*. Apabila level air didalam *drum* terlalu rendah atau tidak terkontrol akan menyebabkan terjadinya *overheating* pada pipa-pipa *boiler*, sedangkan bila *level drum* terlalu tinggi, kemungkinan butir-butir air terbawa ke *turbine* dan mengakibatkan kerusakan pada *turbine*. Untuk mengamankannya pada *boiler drum* dipasang alarm untuk *level high* dan *level low* serta trip untuk *level very low* dan *very high*. Uap yang dihasilkan dari dalam *tube wall* terkumpul di dalam *boiler drum*. Uap akan mengalir ke arah puncak *boiler drum* melewati *steam separator* dan *screen dryer* lalu keluar dari dalam *drum* menuju *superheater* dan akhirnya ke *turbine*. Sedangkan butir-butir air yang jatuh akan bersirkulasi kembali bersama air yang baru masuk.



Gambar 12. *Boiler rum*

Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

f. *Stack* (cerobong)

*Stack* merupakan cerobong asap yang berfungsi sebagai laluan *flue gas* terbuang ke atmosfer. Temperatur *flue gas* sebelum terbuang ke atmosfer dijaga tidak melebihi  $160^{\circ}\text{C}$ , agar tidak terjadi kerusakan lingkungan atau merusak lapisan ozon.



Gambar 13. *Stack*

Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

2. *Auxiliary equipment*

a. *Forced Drought Fan* (FDF)

Berfungsi untuk mengambil udara dari atmosfer dengan suhu sekitar  $30^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Untuk kebutuhan *Fuel oil burner*, setiap FDF mampu melayani 60% dari keperluan beban. Di PLTU ini ada 2 (dua) FDF yang bekerja sekaligus pada 1 unit *boiler*.



Gambar 14. *Forced Drought Fan (FDF)*  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

b. *Air Preheater* (Pemanas Awal Udara)

*Air Preheater* merupakan alat pemanas awal udara pembakaran. Dimana udara yang dihisap oleh FDF dengan temperatur sekitar 30°C mengalir melalui *air preheater* dan dihasilkan temperatur udara sekitar 120°C. Media yang digunakan untuk memanaskan udara melalui *air preheater* adalah *steam* yang diperoleh dari *Auxillary Steam Header* dengan temperatur *steam* 180°C.



Gambar 15. *Air Preheater* (Pemanas Awal Udara)  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

c. *Air heater* (Pemanas Udara)

*Air heater* merupakan salah satu alat yang meningkatkan efisiensi ketel. Karena memanfaatkan kalor yang terkandung pada gas buang hasil pembakaran untuk memanaskan udara. Udara yang telah mengalami proses pemanasan di *air preheater* selanjutnya dialirkan melewati *air heater* untuk dipanaskan kembali. Proses *transfer* panas yang terjadi di *air heater* adalah secara konveksi. Temperatur udara setelah dipanaskan di *air heater* diharapkan 230°C agar memudahkan proses pembakaran. Temperatur *flue gas* melewati *air heater* cukup tinggi sekitar 290°C maka elemen-elemen *air*

*heater* harus tahan panas. Temperatur *flue gas* setelah *air heater* dijaga diatas 135°C, tujuannya adalah untuk mencegah pengendapan sulfur pada sisi dingin *air heater*. Karena sulfur dapat menyebabkan korosi pada elemen-elemen *air heater*. Namun temperatur *flue gas* keluar *air heater* juga dijaga dibawah 160°C, tujuannya adalah agar tidak merusak lingkungan atau dengan kata lain merusak lapisan ozon.



Gambar 16. *Air heater* (Pemanas Udara)  
Sumber : PT. PLN (Persero) Belawan

## 2.4 Generator

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

## 2.5 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 :

1. T-Temperatur

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

2. T-Turbulensi

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

3. T-Time (Waktu)

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

Pembakaran yang sempurna akan menghasilkan tingkat konsumsi bahan bakar ekonomis dan berkurangnya besar kepekatan asap hitam gas buang karena pada pembakaran sempurna campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar seluruhnya dalam waktu dan kondisi yang tepat. Agar terjadi pembakaran yang sempurna maka perlu diperhatikan kualitas bahan bakar sesuai dengan karakteristiknya sehingga homogenitas campuran bahan bakar dengan udara dapat terjadi secara sempurna. Viskositas bahan bakar adalah salah satu karakteristik bahan bakar yang sangat menentukan kesempurnaan proses pembakaran. Viskositas yang tinggi menyebabkan aliran solar terlalu 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 dilebihkan. 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.

### 2.5.1 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 %.

### 2.5.2 Kebutuhan Udara Teoritis

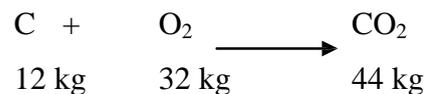
Analisis pembakaran untuk menghitung kebutuhan udara teoritis dapat dilakukan dengan dua cara :

1. Berdasarkan pada satuan berat
2. Berdasarkan pada satuan volume

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

#### 1. Analisis Pembakaran Berdasarkan Berat

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



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

#### 2. Analisis Pembakaran Berdasarkan Volume

Apabila dalam suatu analisis bahan bakar dinyatakan dalam persentase berdasar volume, maka suatu perhitungan yang serupa dengan perhitungan berdasar 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

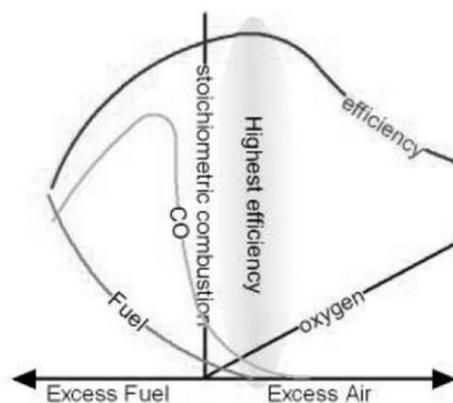
tekanan standar (0°C dan tekanan sebesar 1bar) berisikan molekul dalam jumlah yang sama” (Diklat PLN, 2006).

### 2.5.3 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 :

1. Komposisi gas buang yang meliputi  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  dan  $CO$
2. Pengukuran secara langsung udara yang disuplai

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 17.



Gambar 17. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran dengan Udara Berlebih  
Sumber : Totok Gunawan, 2010

Parameter yang diperlukan untuk kualifikasi bahan bakar dan udara didalam sebuah proses pembakaran adalah rasio udara atau bahan bakar, yaitu jumlah udara di dalam sebuah reaksi terhadap jumlah bahan bakar = mol udara/mol bahan bakar atau massa udara (kg)/massa bahan bakar (kg).

### 2.5.4 Emisi Gas Buang

Polusi udara oleh gas buang merupakan gangguan terhadap lingkungan.

Komponen-komponen gas buang yang membahayakan itu antara lain adalah asap hitam (angus), hidrokarbon yang tidak terbakar, karbon monoksida (CO), oksida nitrogen(NO), dan NO<sub>2</sub>. NO dan NO<sub>2</sub> biasa dinyatakan dengan NO<sub>x</sub> (Arismunandar, 2002:51). Namun jika dibandingkan dengan bensin, solar lebih banyak mengandung CO. Disamping itu kadar NO<sub>2</sub> sangat rendah jika dibandingkan dengan NO. Jadi boleh dikatakan bahwa komponen utama gas buang dari bahan bakar solar yang membahayakan adalah NO dan asap hitam. Selain dari komponen tersebut diatas beberapa hal berikut yang merupakan bahaya atau gangguan meskipun bersifat sementara. Asap putih yang terdiri atas kabut bahan bakar atau minyak pelumas yang terbentuk pada start dingin, asap biru terjadi karena adanya bahan bakar yang tidak terbakar atau tidak terbakar sempurna terutama periode pemanasan, serta bau yang kurang sedap merupakan bahaya yang mengganggu lingkungan. Selanjutnya bahan bakar dengan kadar belerang yang tinggi sebaiknya tidak digunakan karena akan menyebabkan adanya 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 :

1. Konsentrasi oksigen sebagai gas pembakar yang kurang
2. Bahan bakar yang disemprotkan ke dalam ruang bakar terlalu banyak
3. Suhu di dalam ruang bakar terlalu tinggi.
4. Penguapan dan pencampuran bahan bakar dan udara yang ada di dalam silinder tidak berlangsung sempurna
5. 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.

## **2.6 Karakteristik Bahan Bakar**

Syarat-syarat bahan bakar yang baik sebagai berikut :

- a. Mempunyai titik nyala yang rendah, sehingga mudah terbakar
- b. Mempunyai nilai kalori yang tinggi
- c. Tidak menghasilkan gas buang yang beracun dan membahayakan
- d. Asap yang dihasilkan sedikit, tidak banyak membentuk jelaga
- e. Ekonomis, mudah dalam penyimpanan dan pengangkutan
- f. 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

dinginkan sampai suhu kamar ( $H_2O$  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.

### 2.6.1 Solar Sebagai Bahan Bakar

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

1. Warna sedikit kekuningan dan berbau
2. Encer dan tidak mudah menguap pada suhu normal
3. Mempunyai titik nyala yang tinggi ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  sampai  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
4. Terbakar secara spontan pada suhu  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$
5. Mempunyai berat jenis sekitar 0,82 – 0,86
6. Mampu menimbulkan panas yang besar (10.500 kcal/kg)
7. Mempunyai kandungan sulfur yang lebih besar daripada bensin.

Adapun spesifikasi bahan bakar solar adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Spesifikasi Bahan Bakar Solar

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

Sumber : Pertamina 2005

## 2.7 Udara

Udara pada *Water boiler tube* digunakan untuk proses pembakaran. Udara proses dari kompressor yang mengambil udara dari atmosfer dan kemudian disaring dengan filter udara untuk menghilangkan debu atau kotoran lainnya. Dalam keadaan udara kering komposisi unsur-unsur gas yang terdapat pada atmosfer terdiri atas unsur nitrogen (N<sub>2</sub>) 78%, oksigen (O<sub>2</sub>) 21%, carbon dioksida (CO<sub>2</sub>) 0,3%, argon (Ar) 1%, dan sisanya unsur gas lain seperti: ozon (O<sub>3</sub>), hidrogen (H), helium (He), neon (Ne), xenon (Xe), krypton (Kr), radon (Rn), metana, dan ditambah unsur uap air dalam jumlah yang berbeda-beda sesuai dengan ketinggian tempat. Mengenai sifat-sifat dari udara dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. 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           |
| Koefisiensi perpindahan panas   | 1,76 E-5 W/m.K           |
| Entalpi pada 1200°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 *Water tube boiler*, air digunakan sebagai bahan baku utama untuk menghasilkan uap. Uap tersebut akan digunakan untuk memutar turbin. Hasil perputaran turbin akan menghidupkan generator sehingga dihasilkan listrik.

Air umpan adalah air yang disuplai ke *boiler* untuk diubah menjadi steam. Sedangkan sistem air umpan adalah sistem penyediaan air secara otomatis untuk *boiler* sesuai dengan kebutuhan sistem (academia.edu:2011). Secara umum air yang akan digunakan sebagai umpan boiler adalah air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan terjadinya endapan yang dapat membentuk kerak pada *boiler*, air yang tidak mengandung unsur yang dapat menyebabkan korosi terhadap *boiler* dan sistem penunjangnya dan juga tidak mengandung unsur yang

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

Tabel 3. Persyaratan Air Umpan *Boiler*

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

Sumber : PT. Nalco Indonesia

## 2.9 Kualitas Uap

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

1. Dalam jumlah yang benar untuk menjamin bahwa aliran panas yang memadai tersedia untuk perpindahan panas
2. Pada suhu dan tekanan yang benar, atau akan mempengaruhi kinerja
3. Bebas dari udara dan gas yang dapat mengembun yang dapat menghambat perpindahan panas
4. 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
5. 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



7. Kurva uap jenuh, yaitu kurva dimana hanya terdapat uap jenuh saja
8. Titik kritis, yaitu titik pertemuan antara kurva cairan jenuh dan uap jenuh
9. Kualitas  $x$ , dalam suatu campuran uap jenuh dan cairan jenuh, kualitas yang dimaksud disini adalah fraksi massa fasa uapnya. Besaran ini sangat penting untuk diketahui karena perbedaan yang sangat besar antara sifat termodinamika cairan dan uap.

### 2.11 Perhitungan Efisiensi Siklus PLTU

PLTU adalah Unit Pembangkit Termal yang merupakan suatu sistem yang terdiri dari berbagai komponen-komponen seperti: *Boiler*, Turbin, Generator dan alat-alat bantu lainnya.

$$\eta_{STG} = \frac{\text{Panas yang keluar generator}}{\text{Panas Input}} \times 100\%$$

Dimana :

$$\eta_{STG} = \text{Efisiensi } \textit{Steam Power Generation} (\%)$$

Efisiensi siklus PLTU tidak lepas dari peran *Boiler* yang merupakan komponen utama yang terdapat dalam PLTU sehingga tingkat untuk kerja *Boiler*, turbin, generator, kondenser dan pompa harus selalu dipantau sehingga memperoleh untuk kerja yang maksimal untuk meningkatkan efisiensi siklus PLTU sendiri.