

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kopi

Kopi merupakan salah satu jenis tanaman perkebunan yang sudah lama dibudidayakan dan memiliki nilai ekonomis yang cukup tinggi. Konsumsi kopi dunia mencapai 70% berasal dari spesies kopi arabika dan 26% berasal dari spesies kopi robusta. Kopi berasal dari Afrika, yaitu daerah pegunungan di Etopia. Namun, kopi baru dikenal oleh masyarakat dunia setelah tanaman tersebut dikembangkan di luar daerah asalnya, yaitu Yaman di bagian selatan Arab, melalui para saudagar Arab [Rahardjo, 2012].

Di Indonesia kopi mulai di kenal pada tahun 1696, yang di bawa oleh *vereenigde oostindische compagnie* (VOC). Tanaman kopi di Indonesia mulai diproduksi di pulau Jawa, dan hanya bersifat coba-coba, tetapi karena hasilnya memuaskan dan dipandang oleh VOC cukup menguntungkan sebagai komoditi perdagangan maka VOC menyebarkannya ke berbagai daerah agar para penduduk menanamnya [Najiyati dkk., 2004].

Sistematika tanaman kopi robusta menurut Rahardjo [2012] adalah sebagai berikut:

Kerajaan : *Plantae*

Sub kerajaan : *Tracheobionita*

Divisi : *Magnoliophyta*  
Kelas : *Magnoliopsida*  
Sub Kelas : *Astridae*  
Ordo : *Rubiaceace*  
Genus : *Coffea*  
Spesies : *Coffea robusta*

Di dunia perdagangan dikenal beberapa golongan kopi, tetapi yang paling sering dibudidayakan hanya kopi arabika, robusta, dan liberika. Pada umumnya, penggolongan kopi berdasarkan spesies, kecuali kopi robusta. Kopi robusta bukan nama spesies karena kopi ini merupakan keturunan dari berapa spesies kopi terutama *Coffea canephora* [Najiyati dkk., 2004].

## **2.2. Pemanenan Kopi**

Buah kopi yang sudah masak pada umumnya akan bewarna kuning kemerahan sampai merah tua, tetapi ada pula buah yang belum cukup tua namun telah terlihat bewarna kuning kemerahan pucat yaitu kopi yang terserang hama bubuk buah kopi. Buah kopi terserang bubuk ini ada yang sampai mengering di tangkai atau jatuh ke tanah. Buah kopi yang kering tersebut dipetik dan yang jatuh di lahan dipungut secara terpisah dari buah yang masak dan dinamakan pungutan. Pada akhir masa panen dikenal panen yaitu memetik semua buah yang tertinggal di pohon sampai habis, termasuk yang masih muda. Panen ini dimaksudkan guna memutus siklus hidup hama bubuk buah. Untuk memperoleh hasil yang bermutu tinggi, buah kopi harus dipetik setelah betul-betul matang, kopi memerlukan waktu dari kuncup bunga 8–11 bulan untuk robusta dan 6-8 bulan untuk arabika. Beberapa jenis kopi seperti kopi liberika dan kopi yang ditanam di daerah basah

akan menghasilkan buah sepanjang tahun sehingga pemanenan bisa dilakukan sepanjang tahun. Kopi jenis robusta dan kopi yang ditanam di daerah kering biasanya menghasilkan buah pada musim tertentu sehingga pemanenan juga dilakukan secara musiman. Musim panen ini biasanya terjadi mulai bulan Mei atau Juni dan berakhir pada bulan Agustus atau September. Diperkirakan hasil tanaman perkebunan besar dapat mencapai 1000 kg per hektar per tahun, sedangkan kopi robusta tanaman rakyat hanya mencapai 500 kg dan kopi arabika rakyat 200 kg per hektar per tahun [Ridwansyah, 2003].

### **2.3. Pengerinan Buah Kopi**

Pengerinan adalah proses menghilangkan air dari suatu bahan. Proses pengerinan terjadi apabila bahan yang dikeringkan kehilangan sebahagian atau keseluruhan air yang dikandungnya. Proses utama yang terjadi pada proses pengerinan adalah penguapan, dimana penguapan terjadi apabila air yang dikandung oleh suatu bahan teruap meninggalkan bahan yang dikeringkan. Tujuan utama pengerinan pada biji-bijian adalah untuk menghindari terjadinya kerusakan biji. Dalam pengerinan kopi, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi lama pengerinan, diantaranya adalah suhu udara, kelembaban relatif udara, aliran udara, kadar air awal bahan yang telah dicuci sebesar 55% dan kadar akhir bahan mencapai 12%. Pengerinan pada kopi biasanya dilakukan dengan tiga cara yaitu pengerinan secara alami, buatan, dan kombinasi antara alami dan buatan.

#### **1. Pengerinan alami**

Pengerinan alami yaitu pengerinan dengan menggunakan sinar matahari, caranya sangat sederhana tidak memerlukan peralatan dan biaya yang besar tetapi memerlukan tempat pengerinan yang luas dan waktu pengerinan

yang lama karena buah kopi mengandung gula dan pektin. Pengeringan biasanya dilakukan di daerah yang bersih, kering dan permukaan lantai yang rata, dapat berupa lantai plester semen atau tanah telanjang yang telah diratakan dan dibersihkan. Ketebalan pengeringan 30-40 mm, terutama pada awal kegiatan pengeringan untuk menghindari terjadinya proses fermentasi, panas yang timbul pada proses ini akan mengakibatkan perubahan warna dan buah menjadi masak. Terdapat beberapa mikroorganisme yang dapat berkembang biak pada kulit buah diantaranya jamur (*fusarium sp*, *colletotrichum coffeanum*) pada permukaan buah kopi yang terlalu kering (*Aspergillus niger*, *penicillium sp*, *Rhizopus, sp*) beberapa jenis ragi dan bakteri juga dapat berkembang. Lamanya proses pengeringan tergantung pada cuaca, ukuran buah kopi, tingkat kematangan dan kadar air dalam buah kopi, biasanya proses pengeringan memakan waktu sekitar 3 sampai 4 minggu. Setelah proses pengeringan kadar air akan menjadi sekitar 12 % [Ridwansyah, 2003].

## 2. Pengeringan buatan (*artificial drying*)

Pengeringan secara buatan biasanya dilakukan bila keadaan cuaca cenderung mendung. Pengeringan buatan memerlukan alat pengering yang hanya memerlukan waktu sekitar 18 jam tergantung jenis alatnya. Pengeringan ini dilakukan melalui dua tahap. Tahap pertama, pemanasan pada suhu 65-100 °C untuk menurunkan kadar air dari 54% menjadi 30%. Tahap kedua pemanasan pada suhu 50–60 °C untuk menurunkan kadar air menjadi 10-12%

## 3. Pengeringan kombinasi alami dan buatan

Pengeringan ini dilakukan dengan cara menjemur kopi di terik matahari

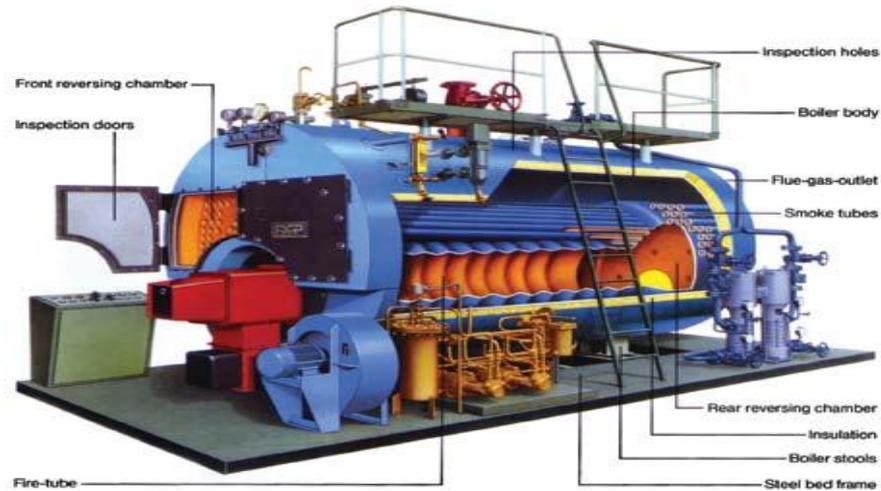
hingga kadar air mencapai 30%. Kemudian kopi dikeringkan lagi secara buatan sampai kadar air mencapai 10-12%. Alat pengering yang digunakan ialah mesin pengering otomatis ataupun dengan rumah (tungku) pengering. Prinsip kerja kedua alat hampir sama yaitu pemanasan kopi dengan uap/udara di dalam ruang tertutup.

#### **2.4. Boiler**

*Boiler* atau yang biasanya disebut ketel uap, 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 untuk berbagai keperluan. 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 klasifikasi *boiler* berdasarkan aliran dalam pipa :

##### 1. *Boiler* pipa api

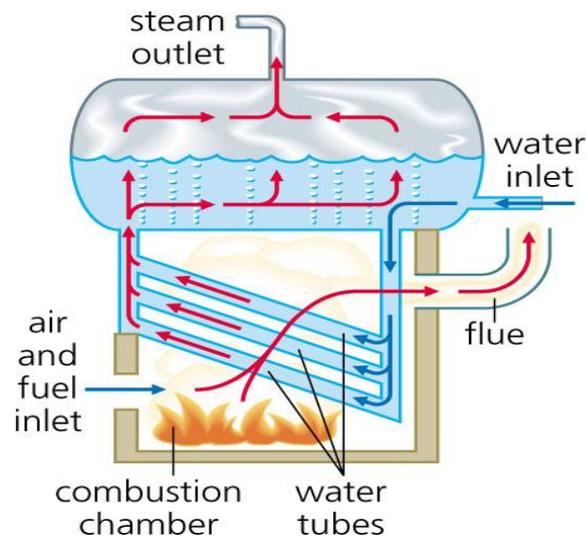
Pada *boiler* pipa api seperti tampak pada Gambar 2.1, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan ketel ada didalam *shell* untuk dirubah menjadi uap. Ketel pipa api biasanya digunakan untuk kapasitas uap yang relatif kecil dengan tekanan uap rendah dan sedang. Sebagai pedoman, *boiler* pipa api kompetitif untuk kecepatan steam sampai 14.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm<sup>2</sup>. *boiler* pipa api dapat menggunakan bahan bakar minyak, gas atau bahan bakar padat dalam operasi.



**Gambar 2.1.** Boiler pipa api  
(Sumber : [www.fapdec.org](http://www.fapdec.org), 2014)

## 2. Boiler pipa air

Pada *boiler* pipa air seperti tampak pada Gambar 2.2, air umpan *boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakaran membentuk uap dalam drum. *Boiler* ini dipilih jika kebutuhan uap dan tekanan yang tinggi seperti pada kasus *boiler* untuk pembangkit tenaga listrik.



**Gambar 2.2.** Boiler pipa air  
(Sumber : [www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org), 2014)

## **2.5. Batubara**

### **2.5.1. Proses Pembentukan Batubara**

Ada beberapa tahapan yang dilalui oleh fosil tumbuhan untuk berubah menjadi batubara. Pada mulanya, tumbuhan hijau melakukan proses fotosintesa dengan bantuan sinar matahari. Dalam proses ini, klorofil atau zat hijau daun pada tanaman menyerap CO<sub>2</sub> yang ada dalam udara dan akar tanaman menyerap air dari dalam tanah. Melalui proses fotosintesa, dari kedua senyawa kimia tersebut akhirnya diproduksi glukosa yang disimpan dalam tanaman dan oksigen yang langsung dilepas ke atmosfer. Glukosa yang dihasilkan sebagian dipakai langsung oleh tanaman sebagai sumber energi kimiawi, sedang sisanya diubah menjadi senyawa lain untuk melanjutkan terjadinya proses pertumbuhan dan perkembangbiakan tanaman. Umumnya, senyawa yang terdapat dalam tanaman adalah senyawa carbon yang menyimpan energi sinar matahari yang diserap sebelumnya.

Planet bumi beserta makhluk hidup penghuninya memiliki sejarah yang tercatat dalam waktu geologi dengan periode sangat panjang, mencapai ratusan juta tahun. Salah satu rangkaian waktu sejarah perjalanan bumi adalah periode Carbonifer atau pembaringan batubara yang terjadi sekitar 300 juta tahun silam. Disebut demikian karena banyak sekali deposit batubara terbentuk pada waktu itu. Para ahli geologi membagi periode ini menjadi dua masa terpisah, yaitu masa Mississipi dan masa Pennsylvania. Periode ini merupakan titik awal dari pertumbuhan tanaman secara besar-besaran dalam waktu singkat pada setiap kontinen.

Hutan tumbuh dengan subur selama masa Carbonifer, menurut para ahli geologi, pada kedua masa itu terdapat rawa-rawa yang terkubur oleh naiknya permukaan laut sehingga menggenangi daratan yang terjadi berulang kali. Sebagaimana akibatnya, hutan-hutan berubah menjadi dasar pembentukan batubara yang sangat luas. Kebanyakan pembentukan deposit batubara ditemukan pada masa Pennsylvania. Batubara terbentuk melalui proses yang sangat kompleks dan memerlukan waktu yang sangat lama, bisa puluhan hingga jutaan tahun bergantung pada jenis batubaranya. Proses ini berlangsung dibawah pengaruh fisika, kimia maupun keadaan geologi setempat. Batubara sebagai senyawa karbon terbentuk dari sisa-sisa tanaman yang terurai setelah mati dan mengalami proses perubahan dalam waktu sangat panjang. Melalui pengamatan mikroskopik, dapat ditemukan serat-serat dan pori-pori tumbuhan pembentukan batubara tersebut.

Di dalam tanah berlumpur dan air menggenang yang kekurangan oksigen, tanaman tidak mengalami proses pembusukan. Pada waktunya, tanaman ini memadat dan membentuk masa spon yang disebut tanah gambut. Proses ini berlangsung terus didalam lumpur pada berbagai bagian bumi. Tanah gambut menggambarkan tahap pertama perubahan dari tumbuhan mati menjadi batubara. Kecepatan pembentukan gambut bergantung pada kecepatan perkembangan tumbuhan dan proses pembusukan. Bila tumbuhan tertutup oleh air dengan cepat, maka akan terhindar oleh proses pembusukan, tetapi terjadi proses disintegrasi atau penguraian oleh mikrobiologi. Bila tumbuhan yang telah mati terlalu lama berada di udara terbuka, maka kecepatan pembentukan gambut akan berkurang,

sehingga hanya bagian keras saja tertinggal dan menyulitkan penguraian oleh mikrobiologi.

Tahapan kedua dalam proses pembentukan batubara adalah penimbunan atau penguburan oleh sedimen baru. Pada tahapan ini proses dinamokimia sangat dominan sedang proses degradasi biokimia tidak berperan lagi. Tanah gambut berangsur-angsur terbentuk selama berjuta-juta tahun dan terkubur dibawah pasir serta lumpur. Karena waktu itu struktur bumi masih sangat labil, maka banyak terjadi lipatan dan pergeseran kerak bumi. Endapan tanah gambut mengalami tekanan yang dahsyat dan diikuti oleh timbulnya panas yang tinggi. Karena peristiwa itu, maka serentetan kejadian mengubah tanah gambut menjadi batubara. Dikenal ada dua teori untuk menjelaskan proses terbentuknya lapisan batubara, yaitu:

1. Teori In Situ yang mengatakan bahwa bahan-bahan pembentuk lapisan batubara terbentuk ditempat dimana tumbuh-tumbuhan asal itu berada. Setelah tumbuhan tersebut mati dan belum mengalami proses transportasi, segera tertutup oleh lapisan sedimen dan mengalami proses pematubaraan (*coalification*) jenis batubara yang terbentuk melalui proses ini mempunyai sebaran yang luas dan merata, kualitasnya baik karena kadar abunya relative kecil.
2. Teori Drift yang mengatakan bahwa bahan-bahan pembentuk lapisan batubara terjadi di tempat yang berbeda dengan tempat tumbuhan semula hidup dan berkembang. Tumbuhan yang telah mati diangkut oleh media air dan terakumulasi di suatu tempat yang selanjutnya tertutup oleh batuan

sedimen dan mengalami proses pembatubaraan. Jenis batubara yang terbentuk melalui proses ini mempunyai penyebaran yang tidak luas namun dapat dijumpai di beberapa tempat. Kualitasnya kurang baik karena mengandung banyak material pengotor yang tercampur pada saat transportasi dari tempat asal tanaman ke tempat sedimentasi.

Tanaman merupakan unsur utama pembentukan batubara. Pertumbuhan tanaman itu terakumulasi pada suatu lingkungan dan zona fisiografi dengan iklim dan topografi tertentu. Faktor tekanan selama proses penimbunan gambut dan waktu merupakan faktor penentu terbentuknya berbagai jenis batubara. Tekanan dapat disebabkan oleh lapisan sedimen penutup yang sangat tebal atau karena tektonik. Hal ini menyebabkan bertambahnya tekanan dan percepatan proses metamorfosa organik. Proses inilah yang selanjutnya mengubah gambut menjadi batubara sesuai dengan perubahan fisik kimia, fisika dan optiknya. Evolusi dari kehidupan menciptakan kondisi yang berbeda selama masa sejarah geologi. Batubara terdapat dalam batuan sedimen klastik, penyebaran tidak merata. Penyebaran dan pengendapan batubara mempunyai nilai ekonomi sangat dipengaruhi oleh keadaan geologi daerah yang bersangkutan dan besarnya cadangan endapan batubara.

Energi matahari yang semula diserap oleh tanaman, masih tetap tersimpan dalam batubara yang terbentuk. Energi itu akan keluar kembali ketika batubara dibakar. Berdasarkan kandungan energi dan karakteristik pembakarannya, dikenal ada empat jenis atau golongan batubara, yaitu:

1. Lignit (berasal dari kata latin yang berarti kayu) merupakan tingkatan batubara paling muda dengan kualitas paling bawah. Disebut lignit karena

masih memperlihatkan struktur dari zat tumbuhan asli termasuk unsur kayunya. Bahan ini memiliki prosentase carbon terendah dibandingkan golongan lainnya. Batubara muda ini juga mempunyai kadar tertinggi zaat volatile yang mudah menguap dan lembab. Tidak disukai karena menghasilkan suhu nyala yang rendah.

2. Batubara Sub-bituminous yang berwarna hitam dan tidak menunjukkan sedikitpun zat kayu jika dilihat dengan mata telanjang. Batubara golongan ini mempunyai lebih 40% carbon terikat dan sebanyak 25% embun.
3. Batubara Bituminous yang berisi carbon terikat lebih tinggi dari 70% sedang kadar embunnya kurang dari 15%. Dikenal juga sebagai bahan baakar yang mudah disundut api dengan nyala kuning. Nilai kalorinya relative tinggi sehingga dapat menghasilkan suhu nyala yang lebih tinggi.
4. Antrasit yang merupakan tingkat tertinggi batubara. Mengandung lebih dari 90% carbon terikat yang menghasilkan api biru. Ketika dibakar tidak mengeluarkan asap dan hanya sedikit berbau, karena kadar abu dan sulfurnya rendah terlipat selama pembentukan gunung-gunung zaman dahulu.

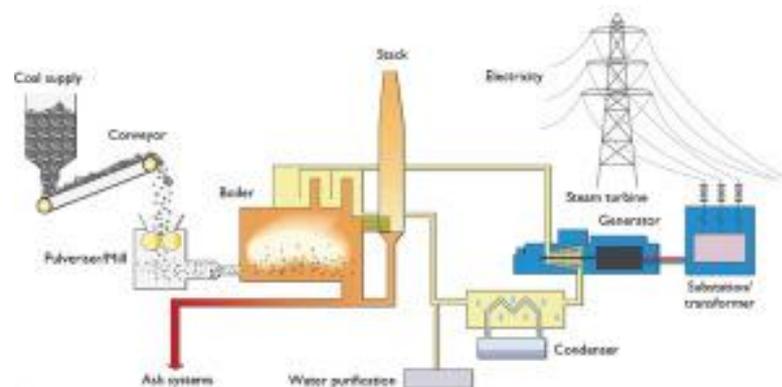
### **2.5.2. Proses Pembakaran dan Pendistribusian Batubara**

Klasifikasi kualitas batubara secara umum terbagi 2, yaitu pembagian secara ilmiah dalam hal ini berdasarkan tingkat pembatubaraan, dan pembagian berdasarkan tujuan penggunaannya. Berdasarkan urutan pembatubaraannya, batubara terbagi menjadi batubara muda (*brown coal* atau lignite), sub bituminous, bituminous, dan antrasit. Sedangkan berdasarkan tujuan

penggunaannya, batubara terbagi menjadi batubara uap (*steam coal*), batubara kokas (*coking coal* atau *metallurgical coal*), dan antrasit.

Batubara uap merupakan batubara yang skala penggunaannya paling luas. Berdasarkan metodenya, pemanfaatan batubara uap terdiri dari pemanfaatan secara langsung yaitu batubara yang telah memenuhi spesifikasi tertentu langsung digunakan setelah melalui proses peremukan (*crushing/milling*) terlebih dulu seperti pada PLTU batubara, kemudian pemanfaatan dengan memproses terlebih dulu untuk memudahkan penanganan (*handling*) seperti CWM (*Coal Water Slurry*), COM (*Coal Oil Mixture*), dan CCS (*Coal Cartridge System*), dan selanjutnya pemanfaatan melalui proses konversi seperti gasifikasi dan pencairan batubara

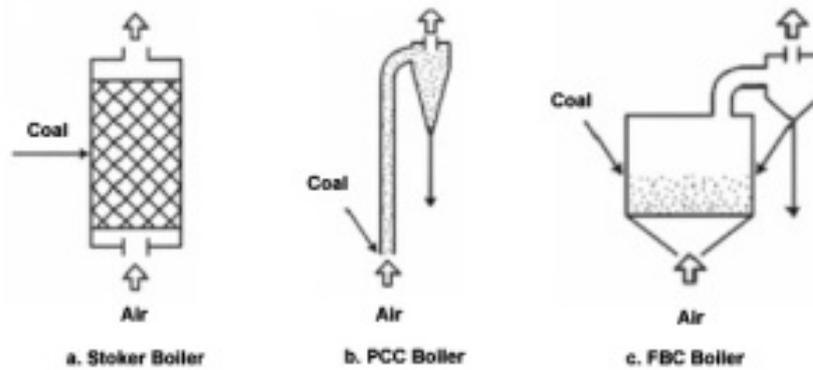
Pada PLTU batubara, bahan bakar yang digunakan adalah batubara uap yang terdiri dari kelas sub bituminous dan bituminous. Lignit juga mulai mendapat tempat sebagai bahan bakar pada PLTU belakangan ini, seiring dengan perkembangan teknologi pembangkitan yang mampu mengakomodasi batubara berkualitas rendah.



**Gambar 2.3.** Skema pembangkitan listrik pada PLTU batubara  
(Sumber: *The Coal Resource*, 2004)

Pada PLTU, batubara dibakar di *boiler* menghasilkan panas yang digunakan untuk mengubah air dalam pipa yang dilewatkan di *boiler* tersebut menjadi uap, yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin dan memutar generator. Kinerja pembangkitan listrik pada PLTU sangat ditentukan oleh efisiensi panas pada proses pembakaran batubara tersebut, karena selain berpengaruh pada efisiensi pembangkitan, juga dapat menurunkan biaya pembangkitan. Kemudian dari segi lingkungan, diketahui bahwa jumlah emisi CO<sub>2</sub> per satuan kalori dari batubara adalah yang terbanyak bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya, dengan perbandingan untuk batubara, minyak, dan gas adalah 5:4:3. Sehingga berdasarkan uji coba yang mendapatkan hasil bahwa kenaikan efisiensi panas sebesar 1% akan dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 2,5%, maka efisiensi panas yang meningkat akan dapat mengurangi beban lingkungan secara signifikan akibat pembakaran batubara.

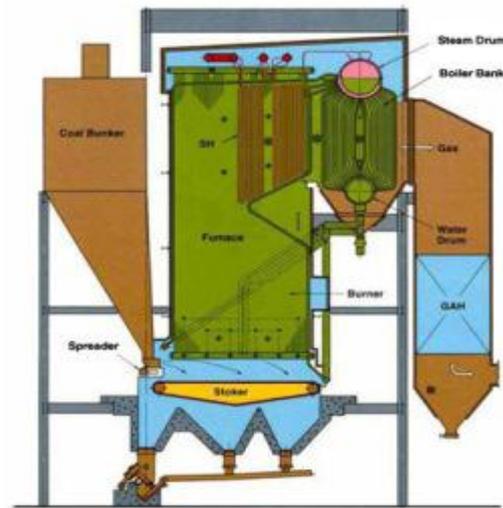
Pada dasarnya metode pembakaran pada PLTU terbagi 3, yaitu pembakaran lapisan tetap (*fixed bed combustion*), pembakaran batubara serbuk (*pulverized coal combustion /PCC*), dan pembakaran lapisan mengambang (*fluidized bed combustion / FBC*). Gambar 2.4 di bawah ini menampilkan jenis – jenis *boiler* yang digunakan untuk masing – masing metode pembakaran.



**Gambar 2.4.** Tipikal *boiler* berdasarkan metode pembakaran  
(Sumber: Idemitsu Kosan Co., Ltd)

a. Pembakaran Lapisan Tetap

Metode lapisan tetap menggunakan *boiler* stoker untuk proses pembakarannya. Sebagai bahan bakarnya adalah batubara dengan kadar abu yang tidak terlalu rendah dan berukuran maksimum sekitar 30mm. Selain itu, karena adanya pembatasan sebaran ukuran butiran batubara yang digunakan, maka perlu dilakukan pengurangan jumlah *fine coal* yang ikut tercampur ke dalam batubara tersebut. Alasan tidak digunakannya batubara dengan kadar abu yang terlalu rendah adalah karena pada metode pembakaran ini, batubara dibakar di atas lapisan abu tebal yang terbentuk di atas kisi api (*traveling fire grate*) pada *boiler* stoker. Bila kadar abunya sangat sedikit, lapisan abu tidak akan terbentuk di atas kisi tersebut sehingga pembakaran akan langsung terjadi pada kisi, yang dapat menyebabkan kerusakan yang parah pada bagian tersebut. Oleh karena itu, kadar abu batubara yang disukai untuk tipe *boiler* ini adalah sekitar 10 – 15%. Adapun tebal minimum lapisan abu yang diperlukan untuk pembakaran adalah 5cm.



**Gambar 2.5.** *Boiler stoker*  
(Sumber: Idemitsu Kosan Co., Ltd)

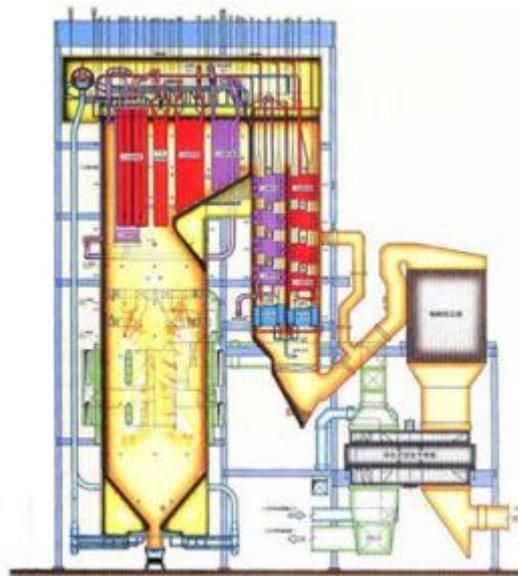
Pada pembakaran dengan stoker ini, abu hasil pembakaran berupa *fly ash* jumlahnya sedikit, hanya sekitar 30% dari keseluruhan. Kemudian dengan upaya seperti pembakaran  $\text{NO}_x$  dua tingkat, kadar  $\text{NO}_x$  dapat diturunkan hingga sekitar 250 – 300 ppm. Sedangkan untuk menurunkan  $\text{SO}_x$ , masih diperlukan tambahan fasilitas berupa alat desulfurisasi gas buang.

b. Pembakaran Batubara Serbuk (*Pulverized Coal Combustion/PCC*)

Saat ini, kebanyakan PLTU terutama yang berkapasitas besar masih menggunakan metode PCC pada pembakaran bahan bakarnya. Hal ini karena sistem PCC merupakan teknologi yang sudah terbukti dan memiliki tingkat kehandalan yang tinggi. Upaya perbaikan kinerja PLTU ini terutama dilakukan dengan meningkatkan suhu dan tekanan dari uap yang dihasilkan selama proses pembakaran. Perkembangannya dimulai dari sub *critical steam*, kemudian *super critical steam*, serta *ultra super critical steam* (USC). Sebagai contoh PLTU yang menggunakan teknologi USC adalah pembangkit no. 1 dan 2 milik J-Power di

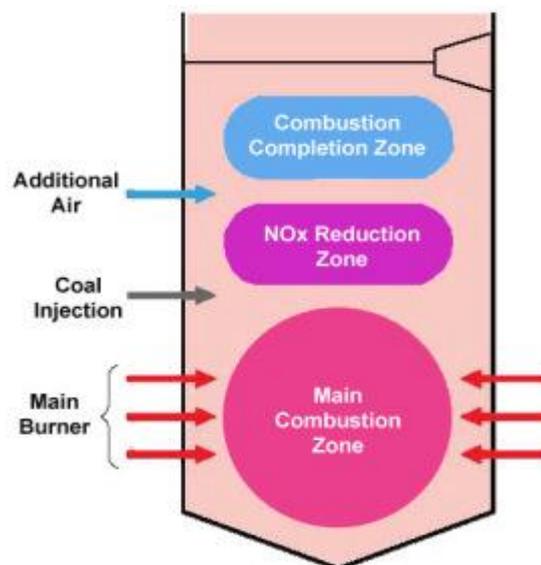
teluk Tachibana, Jepang, yang *boilernya* masing – masing berkapasitas 1050 MW buatan Babcock Hitachi. Tekanan uap yang dihasilkan adalah sebesar 25 MPa ( $254.93 \text{ kgf/cm}^2$ ) dan suhunya mencapai  $600^\circ\text{C}/610^\circ\text{C}$  (*1 stage reheat cycle*).

Pada PCC, batubara diremuk dulu dengan menggunakan *coal pulverizer* (*coal mill*) sampai berukuran 200 mesh (diameter  $74\mu\text{m}$ ), kemudian bersama – sama dengan udara pembakaran disemprotkan ke *boiler* untuk dibakar. Pembakaran metode ini sensitif terhadap kualitas batubara yang digunakan, terutama sifat ketergerusan (*grindability*), sifat slagging, sifat fauling, dan kadar air (*moisture content*). Batubara yang disukai untuk *boiler* PCC adalah yang memiliki sifat ketergerusan dengan HGI (*Hardgrove Grindability Index*) di atas 40 dan kadar air kurang dari 30%, serta rasio bahan bakar (*fuel ratio*) kurang dari 2. Pembakaran dengan metode PCC ini akan menghasilkan abu yang terdiri dari *clinker ash* sebanyak 15% dan sisanya berupa *fly ash*.



**Gambar 2.6. PCC Boiler**  
(Sumber: Idemitsu Kosan Co., Ltd)

Ketika dilakukan pembakaran, senyawa Nitrogen yang ada di dalam batubara akan beroksidasi membentuk  $\text{NO}_x$  yang disebut dengan *fuel*  $\text{NO}_x$ , sedangkan Nitrogen pada udara pembakaran akan mengalami oksidasi suhu tinggi membentuk  $\text{NO}_x$  pula yang disebut dengan thermal  $\text{NO}_x$ . Pada total emisi  $\text{NO}_x$  dalam gas buang, kandungan *fuel*  $\text{NO}_x$  mencapai 80 – 90%. Untuk mengatasi  $\text{NO}_x$  ini, dilakukan tindakan denitrasi (*de-NO<sub>x</sub>*) di *boiler* saat proses pembakaran berlangsung, dengan memanfaatkan sifat reduksi  $\text{NO}_x$  dalam batubara.



**Gambar 2.7.** Proses denitrasi pada *boiler* PCC  
(Sumber: Coal Science Handbook, 2005)

Pada proses pembakaran tersebut, kecepatan injeksi campuran batubara serbuk dan udara ke dalam *boiler* dikurangi sehingga pengapian bahan bakar dan pembakaran juga melambat. Hal ini dapat menurunkan suhu pembakaran, yang berakibat pada menurunnya kadar thermal  $\text{NO}_x$ .

Selain itu, sebagaimana terlihat pada gambar 2.7 di atas, bahan bakar tidak semuanya dimasukkan ke zona pembakaran utama, tapi sebagian

dimasukkan ke bagian di sebelah atas burner utama.  $\text{NO}_x$  yang dihasilkan dari pembakara utama selanjutnya dibakar melalui 2 tingkat. Di zona reduksi yang merupakan pembakaran tingkat pertama atau disebut pula pembakaran reduksi (*reducing combustion*), kandungan Nitrogen dalam bahan bakar akan diubah menjadi  $\text{N}_2$ . Selanjutnya, dilakukan pembakaran tingkat kedua atau pembakaran oksidasi (*oxidizing combustion*), berupa pembakaran sempurna di zona pembakaran sempurna. Dengan tindakan ini,  $\text{NO}_x$  dalam gas buang dapat ditekan hingga mencapai 150 – 200 ppm. Sedangkan untuk desulfurisasi masih memerlukan peralatan tambahan yaitu alat desulfurisasi gas buang.

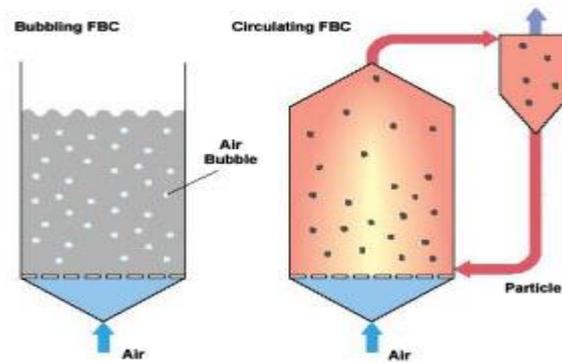
c. Pembakaran Lapisan Mengambang (*Fluidized Bed Combustion/FBC*)

Pada pembakaran dengan metode FBC, batubara diremuk terlebih dulu dengan menggunakan *crusher* sampai berukuran maksimum 25mm. Tidak seperti pembakaran menggunakan stoker yang menempatkan batubara di atas kisi api selama pembakaran atau metode PCC yang menyemprotkan campuran batubara dan udara pada saat pembakaran, butiran batubara dijaga agar dalam posisi mengambang, dengan cara melewatkan angin berkecepatan tertentu dari bagian bawah *boiler*. Keseimbangan antara gaya dorong ke atas dari angin dan gaya gravitasi akan menjaga butiran batubara tetap dalam posisi mengambang sehingga membentuk lapisan seperti fluida yang selalu bergerak. Kondisi ini akan menyebabkan pembakaran bahan bakar yang lebih sempurna karena posisi batubara selalu berubah sehingga sirkulasi udara dapat berjalan dengan baik dan mencukupi untuk proses pembakaran.

Karena sifat pembakaran yang demikian, maka persyaratan spesifikasi bahan bakar yang akan digunakan untuk FBC tidaklah seketat pada metode pembakaran yang lain. Secara umum, tidak ada pembatasan yang khusus untuk kadar zat terbang (*volatile matter*), rasio bahan bakar (*fuel ratio*) dan kadar abu. Bahkan semua jenis batubara termasuk peringkat rendah sekalipun dapat dibakar dengan baik menggunakan metode FBC ini. Hanya saja ketika batubara akan dimasukkan ke *boiler*, kadar air yang menempel di permukaannya (*free moisture*) diharapkan tidak lebih dari 4%. Selain kelebihan di atas, nilai tambah dari metode FBC adalah alat peremuk batubara yang dipakai tidak terlalu rumit, serta ukuran *boiler* dapat diperkecil dan dibuat kompak.

Bila suhu pembakaran pada PCC adalah sekitar 1400 – 1500°C, maka pada FBC, suhu pembakaran berkisar antara 850 – 900°C saja sehingga kadar thermal NO<sub>x</sub> yang timbul dapat ditekan. Selain itu, dengan mekanisme pembakaran 2 tingkat seperti pada PCC, kadar NO<sub>x</sub> total dapat lebih dikurangi lagi.

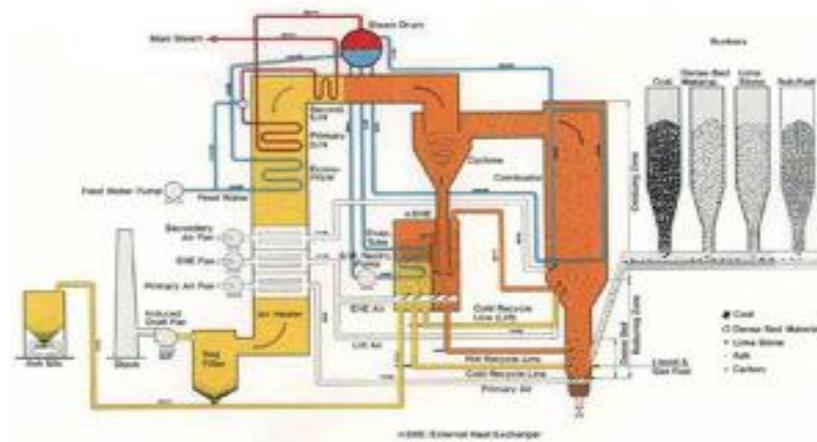
Kemudian, bila alat desulfurisasi masih diperlukan untuk penanganan SO<sub>x</sub> pada metode pembakaran tetap dan PCC, maka pada FBC, desulfurisasi dapat terjadi bersamaan dengan proses pembakaran di *boiler*. Hal ini dilakukan dengan cara mencampur batu kapur (*lime stone*, CaCO<sub>3</sub>) dan batubara kemudian secara bersamaan dimasukkan ke *boiler*. SO<sub>x</sub> yang dihasilkan selama proses pembakaran, akan bereaksi dengan kapur membentuk gipsum (kalsium sulfat). Selain untuk proses desulfurisasi, batu kapur juga berfungsi sebagai media untuk *fluidized bed* karena sifatnya yang lunak sehingga pipa pemanas (*heat exchanger tube*) yang terpasang di dalam *boiler* tidak mudah aus.



**Gambar 2.8.** Tipikal *boiler* FBC  
(Sumber: Coal Science Handbook, 2005)

Berdasarkan mekanisme kerja pembakaran, metode FBC terbagi 2 yaitu *Bubbling* FBC dan *Circulating* FBC (CFBC), seperti ditampilkan pada gambar 2.8 di atas. Dapat dikatakan bahwa *Bubbling* FBC merupakan prinsip dasar FBC, sedangkan CFBC merupakan pengembangannya.

Pada CFBC, terdapat alat lain yang terpasang pada *boiler* yaitu cyclone suhu tinggi. Partikel media *fluidized bed* yang belum bereaksi dan batubara yang belum terbakar yang ikut terbang bersama aliran gas buang akan dipisahkan di cyclone ini untuk kemudian dialirkan kembali ke *boiler*. Melalui proses sirkulasi ini, ketinggian *fluidized bed* dapat terjaga, proses denitrasi dapat berlangsung lebih optimal, dan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi dapat tercapai. Oleh karena itu, selain batubara berkualitas rendah, material seperti biomasa, sludge, plastik bekas, dan ban bekas dapat pula digunakan sebagai bahan bakar pada CFBC. Adapun abu sisa pembakaran hampir semuanya berupa *fly ash* yang mengalir bersama gas buang, dan akan ditangkap lebih dulu dengan menggunakan *Electric Precipitator* sebelum gas buang keluar ke cerobong asap (*stack*).



**Gambar 2.9.** CFBC Boiler

(Sumber: Idemitsu Kosan Co., Ltd)

Pada FBC, bila tekanan di dalam boiler sama dengan tekanan udara luar, disebut dengan Atmospheric FBC (AFBC), sedangkan bila tekanannya lebih tinggi dari pada tekanan udara luar, sekitar 1 MPa, disebut dengan *Pressurized* FBC (PFBC).

Faktor tekanan udara pembakaran memberikan pengaruh terhadap perkembangan teknologi FBC ini. Untuk *Bubbling* FBC berkembang dari PFBC menjadi *Advanced* PFBC (A-PFBC), sedangkan untuk CFBC selanjutnya berkembang menjadi *Internal* CFBC (ICFBC) dan kemudian *Pressurized* ICFBC (PICFBC).

## 2.6. Persamaan Perancangan

### 2.6.1. Dasar-Dasar Mekanisme Perpindahan Energi Panas

Pada dasarnya terdapat tiga macam proses perpindahan energi panas, yaitu perpindahan panas secara konduksi, konveksi dan radiasi. Dimana perpindahan panas secara konduksi dan konveksi terjadi pada material padat dan cair, sedangkan perpindahan energi panas secara radiasi terjadi pada ruang hampa.

a. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan perpindahan panas yang disalurkan secara langsung antar molekul tanpa adanya perpindahan dari molekul yang bersangkutan. Proses konduksi terjadi pada benda padat, cair maupun gas, jika terjadi kontak secara langsung dari ketiga macam benda tersebut. Persamaan konduksi dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Q_{kond} = k.A \left( - \frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

Dimana  $Q_{kond}$  = Besar perpindahan panas konduksi  
 $k$  = Konduktivitas thermal bahan  
 $A$  = Luas penampang  
 $dT$  = Gradient temperatur  
 $dx$  = Tebal dinding

b. Konveksi

Perpindahan energi panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (cairan/gas).

$$Q_{conv} = h.A.\Delta T \quad (2.2)$$

Dimana  $Q_{conv}$  = Besar perpindahan panas konveksi  
 $h$  = Koefisien perpindahan panas konveksi  
 $A$  = Luas penampang  
 $\Delta T$  = Gradient temperatur

c. Radiasi

Perpindahan energi panas secara radiasi ini berbeda dengan proses-proses perpindahan panas lain, energi radiasi dirambatkan menggunakan gelombang elektromagnetik diantara dua objek yang dipisahkan oleh jarak dan perbedaan temperatur dan tanpa medium penghantar, yang bisa dirumuskan sebagai berikut.

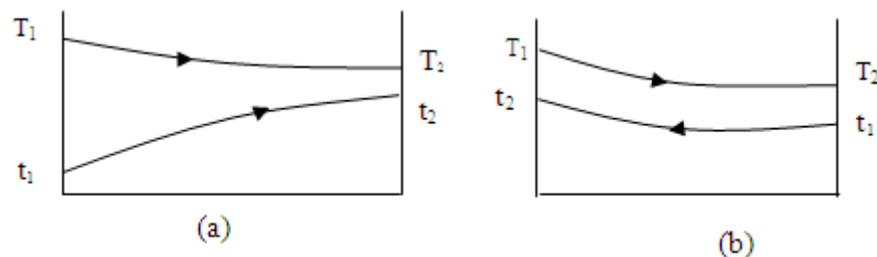
$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

Dimana  $E$  = Emisi  
 $\varepsilon$  = Emisivitas  
 $T_s$  = Temperatur permukaan

### 2.6.2. Log Mean Difference Temperature (LMTD)

Aliran fluida pada alat penukar kalor tipe pipa dan shell dapat berlangsung secara sejajar (*parallel flow*) seperti diberikan pada Gambar 2.10a dan aliran berlawanan (*counter flow*) seperti diberikan pada Gambar 2.10b. Aliran sejajar adalah aliran di mana fluida panas dan fluida dingin memasuki pipa dari arah yang sama, sedangkan aliran berlawanan adalah aliran fluida panas dan fluida dingin mempunyai arah yang berlawanan. Kelebihan aliran berlawanan dibandingkan dengan aliran sejajar adalah dimungkinkannya temperatur ke luar sisi panas lebih rendah daripada temperatur ke luar sisi dingin. Nilai selisih temperatur rata-rata logaritmik (LMTD) pada alat penukar kalor tipe *shell and tube* dengan aliran fluida sejajar dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta T_{LMTD} = \left( \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}} \right) \quad (2.4)$$



**Gambar 2.10** Aliran sejajar (a), aliran berlawanan (b)

Sedangkan harga selisih temperatur rata-rata logaritmik pada aliran berlawanan dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta T_{LMTD} = \left( \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \right) \quad (2.5)$$

Dengan,  $\Delta T_{lm}$  adalah selisih temperatur rata-rata logaritmik ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_1$  adalah temperatur fluida masuk *tube* ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$  adalah temperatur fluida ke luar *tube* ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_1$  adalah temperatur fluida masuk *shell* ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan  $t_2$  adalah temperatur fluida ke luar *shell* ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.6.3. Perancangan *evaporator*

Aliran di dalam celah adalah tertutup sempurna, maka kesetimbangan energi dapat digunakan untuk menentukan temperatur fluida yang bervariasi dan nilai total transfer panas konveksi  $Q_{(x)}$  tergantung dari laju aliran massa. Jika perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan, maka pengaruh yang signifikan adalah perubahan energi thermal dan fluida kerja. Sehingga kesetimbangan energi tergantung pada 3 variable, yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Q_{(x)} = \dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2.6)$$

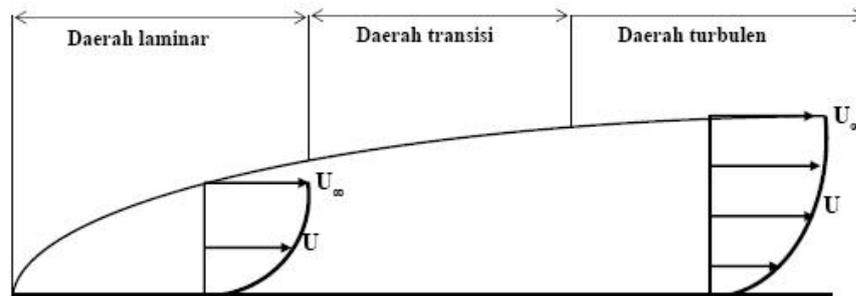
Dimana

- $Q_{(x)}$  = total transfer panas (W)
- $\dot{m}$  = aliran massa yang melalui celah (kg/s)
- $C_p$  = koefisien perpindahan panas (Kj/kg.K)

$T_{f,o}$  = temperatur fluida keluar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{f,i}$  = temperatur fluida masuk ( $^{\circ}\text{C}$ )

Setiap aliran fluida mempunyai nilai bilangan Reynolds yang merupakan pengelompokan aliran yang mengalir, pada plat datar dapat dilihat pada gambar berikut :

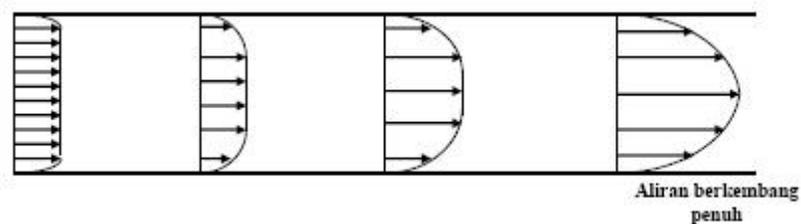


**Gambar 2.11.** Daerah aliran lapisan batas plat rata

Pengelompokan aliran yang mengalir tersebut dapat diketahui dengan bilangan Reynold, sebagai berikut :

$$\text{Re} = \frac{U_{\infty} \cdot X}{\nu} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot X}{\mu} \quad (2.7)$$

Transisi dari aliran laminar menjadi turbulen terjadi bila  $\text{Re} > 5 \cdot 10^5$ , untuk aliran sepanjang plat rata, lapisan batas selalu turbulen untuk  $\text{Re} \geq 4 \cdot 10^6$ . Untuk aliran dalam tabung dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 2.12.** Diagram aliran dalam tabung

Pada aliran dalam tabung, aliran turbulen biasanya pada

$$\text{Re} = \frac{U_m \cdot d}{\nu} = \frac{\rho \cdot U_m \cdot d}{\mu} \geq 2300 \quad (2.8)$$

Parameter yang menghubungkan ketebalan relative antara lapisan batas hidronamik dan lapisan batas termal adalah maksud dari angka prandtl, angka ini dapat ditentukan dengan menggunakan tabel, maupun dengan menggunakan persamaan, seperti berikut ini :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho \cdot C_p} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (2.9)$$

Angka nusselt dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Nu}_x = \frac{h_x \cdot x}{k} \quad (2.10)$$

Untuk bidang yang dipanaskan pada keseluruhan bagiannya, memiliki persamaan Nusselt sebagai berikut :

$$\text{Nu}_x = C P_r^{1/3} \text{Re}_x^m \quad (2.11)$$

Dimana nilai ( $C$ ) dan ( $m$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan tabel acuan berikut ini :

**Tabel 2.1. Konstanta untuk silinder pada aliran bersilangan**

$Re_D$	$C$	$M$
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40,000	0.193	0.618
40,000-400,000	0.027	0.805

(Sumber : *fundamentals of heat and mass transfer six edition. Chapter 7*)

Sedangkan untuk mengetahui nilai Nusselt dapat juga menggunakan perbandingan diameter dalam dan luar pipa yang bekerja, dengan menggunakan tabel acuan berikut ini :

**Tabel 2.2. Bilangan Nusselt untuk aliran laminar sepenuhnya dalam tabung anulus melingkar dengan satu permukaan terisolasi**

$Di/Do$	$Nu_i$	$Nu_o$	<i>Comments</i>
0.00	-		
0.05	17.46	3.66	see Equation 8.55
0.10	11.56	4.06	
0.25	7.37	4.11	
0.50	5.74	4.23	
1.00	4.86	4.86	see Table 8.1, b/a

(Sumber : *fundamentals of heat and mass transfer six edition. Chapter 8*)

Koefisien pindah panas digunakan dalam perhitungan pindah panas konveksi atau perubahan fase antara cair dan padat dengan menggunakan persamaan berikut.

$$h = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta T} \quad (2.12)$$

Dari persamaan di atas, koefisien pindah panas adalah koefisien proporsionalitas antara fluks panas,  $Q/(A \Delta T)$ , dan perbedaan temperatur yang menjadi penggerak utama perpindahan panas, persamaan lain untuk menentukan koefisien perpindahan konveksi secara menyeluruh menggunakan persamaan berikut.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{in}} + \frac{1}{h_{out}}} \quad (2.13)$$

Dimana  $U$  : Koefisien perpindahan panas konveksi menyeluruh ( $W/m^2.K$ )  
 $h_{in}$  : Koefisien perpindahan panas konveksi bagian dalam ( $W/m^2.K$ )  
 $h_{out}$  : Koefisien perpindahan panas konveksi bagian luar ( $W/m^2.K$ )

#### 2.6.4. Perancangan konsumsi bahan bakar

Untuk menentukan kapasitas penggunaan bahan bakar yang ideal pada setiap kerja pada *boiler*, diperlukan persamaan konsumsi bahan bakar, sebagai berikut :

$$K_{bb} = \frac{Q}{LHV} \quad (2.14)$$

Dimana  $K_{bb}$  : Konsumsi bahan bakar (kg/s)  
 $Q$  : Jumlah kebutuhan kalor (KW)  
 $LHV$  : *Low Heating Value* (KJ/kg)

#### 2.6.5. Perancangan rasio udara bahan bakar teoritis (*AFR*)

Perbandingan antara massa campuran udara dan bahan bakar, sangat berpengaruh pada kualitas pembakaran. Setiap bahan bakar memiliki standart tersendiri, beberapa rasio perbandingan udara dan bahan bakar yang minimum, sehingga reaksi pembakaran dapat berlangsung secara sempurna. Rasio standar bahan bakar disebut dengan *AFR* teoritis.

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{teoritis} = \frac{m \text{ udara}}{m \text{ bahan bakar}} \quad (2.15)$$