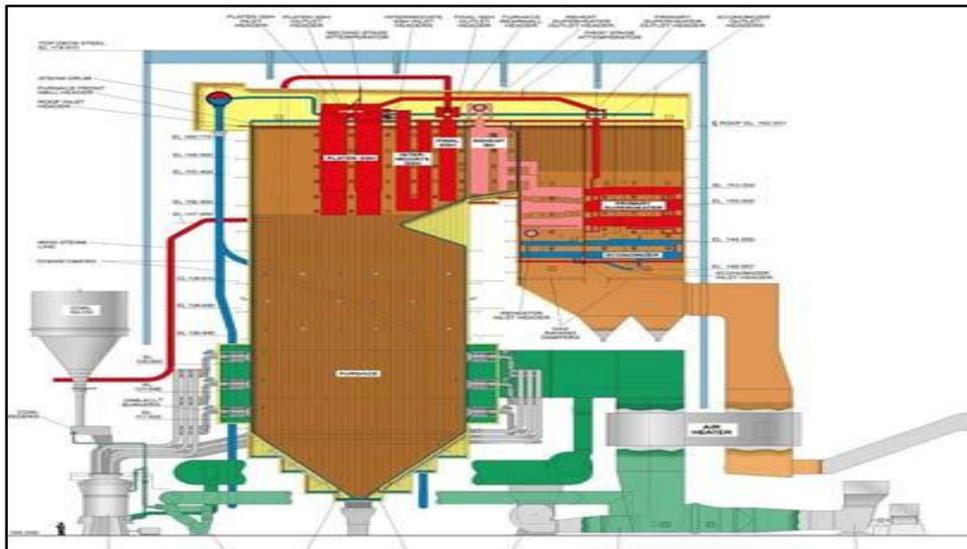


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pulverizer

PLTU dengan bahan bakar batubara memerlukan perlakuan khusus agar kalor yang terkandung dalam batu bara dapat sempurna. Salah satu peralatan yang diperlukan pada PLTU bahan bakar batubara adalah *Pulverizer* dan *Coal Feeder*. Fungsi *Pulverizer* (mill) pada sistem bahan bakar batubara adalah menggiling/menghaluskan bongkahan-bongkahan batubara sehingga menjadi bubuk batubara. Bubuk batubara (*Pulverizer*) mempunyai ukuran sekitar 200 Mesh.

Tujuan menggiling batubara adalah membuat luas permukaan bubuk batubara menjadi besar, sehingga dalam proses pembakaran antara batubara dan udara lebih homogen dan pembakaran menjadi lebih sempurna. Batubara halus yang ada didalam *Pulverizer*, didorong dengan menggunakan udara panas (suhu *mill outlet* $\pm 60^\circ$), masuk ke *furnace* dan batubara terbakar dalam *furnace*. Udara panas yang digunakan untuk mendorong serbuk batubara ini biasa disebut sebagai *primary air*.



Gambar 1. Boiler 300 MW

Corner burner for mill pulverizer coal Adalah alat yang dipergunakan untuk menghancurkan/menggiling batubara menjadi butiran halus (powder), kemudian butiran halus ini dihembus udara yang bertekanan dari bagian bawah mill pulverizer sehingga naik/terbang menuju outlet mill pulverizer dan kemudian menuju ruang bakar bersama udara untuk pembakaran pada boiler. Ukuran kehalusan batubara dari mill pulverizer disebut Fineness. Untuk batubara Lower Ranked (Subbituminus dan lignite) Finenesnya sering diijinkan = 65% sampai 70% untuk mesh 200. Untuk batubara Higher Ranked (bituminus) Finenessnya = 70% sampai 75 % untuk mesh 200.

Setiap pabrik mempunyai cara untuk menentukan type mill pulverizer. Jika dilihat dari putaranya mill pulverizer di bagi menjadi tiga, yaitu : *High Speed Mill pulverizer, Medium Speed Mill pulverizer, Low Speed Mill pulverizer.*

2.2 Hal Yang Mempengaruhi Kapasitas Mill Pulverizer

1. HGI (Hardgrove Grindability Index) makin tinggi, maka semakin banyak batubara yang digiling, yang berarti kapasitas mill pulverizer naik, demikian juga sebaliknya. Untuk setiap point perubahan HGI akan terjadi perubahan kapasitas mill pulverizer sekitar 1 – 1/3% .
2. Fineness makin tinggi berarti memerlukan waktu lebih lama untuk grinding, yang berarti kapasitas menurun, demikian sebaliknya. *Moisture* makin tinggi, maka kapasitas akan menurun karena memerlukan waktu pengeringan lebih lama dan batubara basah lebih

2.3 Coal Burner

Coal Burner adalah perangkat mekanis yang membakar bubuk batubara menjadi api secara terkendali. burner batubara terutama terdiri dari mesin batubara bubuk, sejumlah mesin pembakaran (termasuk ruang bakar, otomatis bolak-balik sistem gerak, sistem rotasi otomatis, pembakaran sistem suplai udara) sistem kontrol, sistem pengapian, dan lain-lain.



Gambar 2. Coal Burner

2.4 Manfaat Coal Burner

Pembakar batubara bubuk memiliki berbagai macam kegunaan dalam produksi industri seperti menyediakan panas untuk boiler, pabrik aspal hotmix, kiln semen, tungku logam, anil, pendinginan tungku, pengecoran presisi shell pembakaran tungku, tungku peleburan, penempaan tungku dan tungku pemanas atau kiln.

1. Coal Pulverizer (Mill).

Coal pulverizer berfungsi untuk menggerus batu bara yang di suplai dari coal feeder dengan kehalusan 200 mesh (yang akan di saring oleh classifier di dalam mill) dan selanjutnya serbuk batu bara tersebut di transportasikan dengan bantuan udara primer. Untuk material batu bara yang kehalusanya kurang dari 200 mesh atau tidak dapat tergerus dan material berupa batu, besi kayu, dll akan dibuang melalui reject hopper yang akan di bersihkan oleh scrapper. Di dalam mill sendiri terdapat grinding roll untuk menggerus batu bara yang sudah terumpan dalam sebuah bowl berputar yang di gerakkan oleh motor listrik dengan daya 600kW.

2. Coal Pipe.

Pulverizer (bubuk batubara) hasil penggilingan di dalam Mill dihembuskan dengan udara panas dari primary air sistem melalui coal pipe ini. Didalam sepanjang coal pipe ini juga dilapisi semacam keramik, hal ini bertujuan mengurangi faktor gesekan antara dinding pipa dan serbuk batu bara secara langsung sehingga sangat berpotensi menimbulkan kebakaran dalam line coal pipe tersebut selain itu pemasangan keramik di dalam coal pipe juga untuk memperlancar aliran batu bara karna koefisien gesekan semakin kecil.

3. Coal Nozzle.

Fungsi dari coal nozzle adalah mencampur udara sekunder dengan batubara dan udara primer yang kemudian akan dilakukan pembakaran di dalam ruang bakar. Arah coal nozzle bisa digerakkan 30^0 ke bawah dan 30^0 ke atas oleh tilting untuk pengaturan temperature serta pressure main steam agar tercapai sesuai set poin. Bila coal nozzle ini mengalami kerusakan maka proses pencampuran ini akan kurang sempurna sehingga pembakaran kurang bagus.

2.5 Keunggulan Pulverize Coal Burner (PCB)

1. Mudah dalam pengoperasian

Unit ini dilengkapi dengan main kontroller sehingga proses pembakaran yang terjadi disesuaikan dengan keperluan. Masuknya batu bara ke dalam unit Combustion Chamber diatur oleh main kontroller.

2. Pembakaran sempurna

Ukuran batu bara yang masuk dalam ruang bakar $0 - 0.08$ mm memungkinkan batu bara untuk langsung terbakar saat melalui temperatur yang tinggi di dalam combustion chamber ($\pm 600^{\circ}\text{C}$).

3. Tidak ada Batubara yang Terbuang

Karena proses pembakaran yang sempurna dalam combustion chamber, maka semua batubara akan habis terbakar.

4. Pemeliharaan Mudah

5. Limbah Ramah Lingkungan

Abu batubara dari sisa pembakaran yang keluar melalui unit *dryer* akan ditangkap oleh *dust collector*.

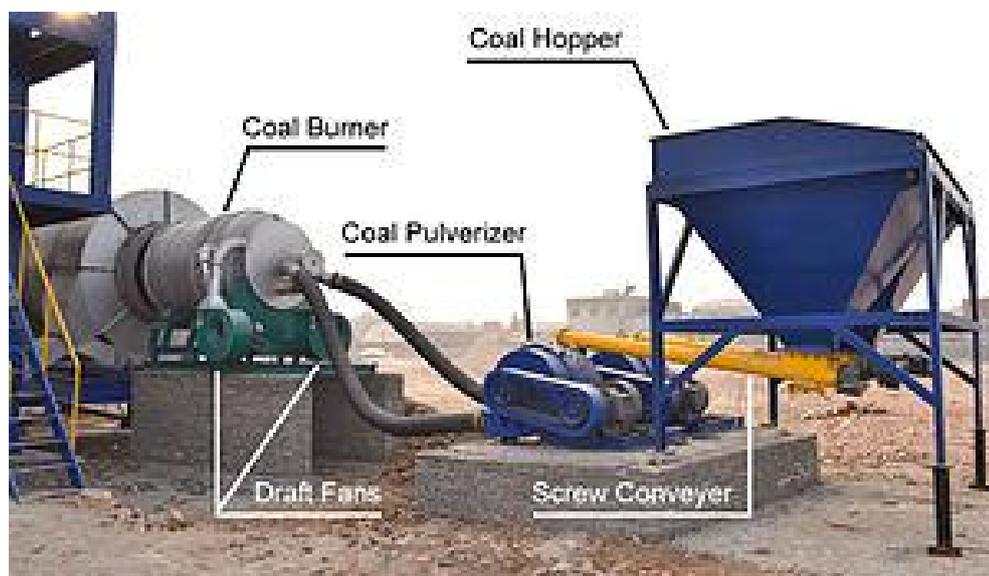
6. Pemanasan Awal yang Singkat

Di dalam *combustion chamber* bata tahan api akan menyimpan panas yang cukup tinggi, sehingga bila pengoperasian unit *dryer* mengalami jeda waktu < 5 jam maka untuk pemanasan awal hanya $< \frac{1}{2}$ jam, bila berhenti produksi waktu yang diperlukan < 2 jam.

7. Hemat Bahan Bakar

Harga bahan bakar batu bara yang relatif murah dan cenderung stabil dibandingkan dengan penggunaan BBM maka unit ini memberikan keuntungan materi yang sangat tinggi

Di tempat kerja, kompor batubara bekerja dengan pulverizer batubara dan hopper batubara biasanya. Batubara dalam hopper disampaikan kepada pulverizer batubara dengan sekrup konveyor. The pulverizer batubara akan menghancurkan batubara menjadi batubara bubuk. Dalam burner batubara, batubara bubuk bercampur dengan udara (aliran udara kecepatan tinggi yang dihasilkan oleh draft fan pada burner batu bara), dan dinyalakan oleh penyala pembakaran minyak.



Gambar 3. Struktur utama coal burner

2.6 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, hydrogen dan sulfur. Tujuan dari pembakaran yang sempurna adalah melepaskan seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar.

Reaksi pembakaran secara umum terjadi melalui 2 cara, yaitu pembakaran sempurna dan pembakaran habis. Pembakaran sempurna adalah proses pembakaran yang terjadi jika semua karbon bereaksi dengan oksigen menghasilkan CO₂, sedangkan pembakaran habis adalah proses pembakaran yang terjadi jika bahan bakar terbakar habis adalah proses pembakaran yang tidak semuanya menjadi CO₂. (Abdullah et,al.,1998 dalam Arif Budiman, 2001)

Menurut Culp (1991 dalam Arif Budiman, 2001) proses pembakaran actual dipengaruhi oleh 5 Faktor, yaitu :

- a. Pencampuran udara dan bahan dengan baik
- b. Kebutuhan udara untuk proses pembakaran
- c. Suhu pembakaran
- d. Lamanya waktu pembakaran yang berhubungan dengan laju pembakaran
- e. Berat jenis bahan yang akan dibakar.

Pencampuran udara dan bahan bakar yang baik dalam pembakaran actual biasanya tidak dapat dicapai tetapi didekati melalui penambahan *excess* udara. Penambahan *excess* udara harus baik dengan nilai minimum karena apabila terlalu banyak dapat meningkatkan kehilangan energi dalam pembakaran dan meningkatnya emisi NO_x. Tingkat kesempurnaan pembakaran di pengaruhi oleh beberapa variable berikut :

- a. Temperatur

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

Turbulensi

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

c. *Time*

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

2.7 Campuran Udara Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air-fuel Ratio*), FAR (*Fuel-air Ratio*), dan Rasio Ekivalen.

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

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

2.8 Karakteristik nyala

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

Salah satu metode untuk mendapatkan batas bawah dan atas mula-mula dilakukan dengan menggunakan tabung api yang dikembangkan oleh US Bureau of Mines. Pada metoda ini experiment dilakukan untuk mendeterminasikan batas bawah dan atas dari mampu nyala api. Skema terlihat seperti di bawah berikut, terdiri dari tabung vertikal sepanjang 0.5 m dan dengan diameter dalam sebesar 0.05 m.

2.9 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala

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

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

Pergerakan penjalaran api dan bentuk dari kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi.

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

1. Ketidak stabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
2. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.

3. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
4. Ketidakstabilan Landau, Ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun buoyancy tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat (*incompressible*).
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer. Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.10 Kestabilan Nyala Api

Pergerakan penjalaran api dan bentuk dari kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi.

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

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

kalor dengan nyala primer. Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.11 Laju Nyala Api Laminer

Proses reaksi pembakaran dalam suatu nyala api adalah gabungan dari reaksi kimia, perpindahan panas (konduksi, konveksi, dan radiasi), perpindahan massa dan momentum dengan difusi dan pola aliran sehingga bentuk dan ukuran nyala sangat dipengaruhi oleh tahapan proses yang terjadi, sehingga bentuk nyala api dimensi satu dibagi menjadi empat daerah tahapan proses yaitu:

- Daerah gas yang belum terbakar (*Unburned gas zone*)
- Daerah pemanasan awal (*Preheating zone*)
- Daerah reaksi (*Reaction zone*)
- Daerah gas terbakar (*Burned gas*)

Gas *premix* yang akan berubah menjadi nyala *premix* memiliki kesamaan pada kecepatan, temperatur, dan konsentrasi dengan bentuk fisik yang tetap dalam daerah gas yang belum terbakar (*unburned gas zone*). Dalam daerah *preheating* temperatur naik akibat konduksi energi panas dan pada daerah ini gas *premix* menerima energi panas lebih besar dibandingkan daerah lain.

Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

1. Daerah reaksi primer, di mana sebagian besar hidrokarbon bereaksi, akibatnya laju reaksi dan temperatur naik secara cepat.
2. Daerah setelah pembakaran (*after-burning region*), di mana terjadi perubahan bentuk produk pertengahan seperti CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O dengan laju reaksi lebih lambat dan kenaikan temperatur yang rendah.

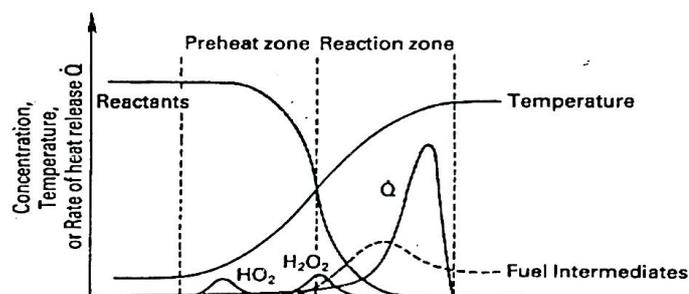
2.12 Pembakaran Premix

Pembakaran dapat dilakukan secara premix maupun secara difusi. Pembakaran secara premix adalah pembakaran dimana bahan bakar (fuel) bercampur secara sempurna di dalam burner sebelum dialirkan kemulut burner dan mulai dibakar sedangkan proses pembakaran sistem difusi merupakan proses pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar yang dialirkan melalui burner belum tercampur dengan udara, namun pencampuran tersebut terjadi pada saat di ujung burner dan menyala di tempat yang sama. Dalam hal ini pembakaran premix lah yang menjadi topik.

Pada pembakaran premix terdapat tiga macam gelombang (wave), dimana ketiga gelombang ini dibedakan dari cepat rambat gelombang terhadap reaksi campuran dalam gas premix, ketiganya yaitu:

Zona dari gelombang pembakaran terbagi dua, yaitu :

1. Zona pra pemanasan (preheat zone) Daerah di mana sedikit panas yang dilepaskan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (unburn fuel).
2. Zona Pemanasan (reaction zone) Daerah di mana sebagian besar energi kimia dilepaskan. Seperti yang terlihat dari gambar di bawah ini.

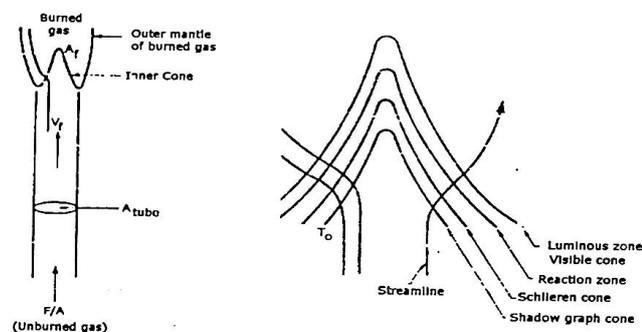


Gambar 4. Profil Nyala Api

(Sumber : Dougal Drysdale, *An Introduction To Fire Dynamics*, England)

2.12.1 Nyala API Premix (Premix Flame)

Pada gambar terlihat bentuk dari nyala api premix. Pada daerah yang berbentuk kerucut atau segitiga biasa disebut juga luminous flame terjadi reaksi dan pelepasan energi panas sebagai entalpi reaksi gas yang terbakar, sedangkan di bawahnya terdapat daerah gelap (dark zone), yaitu tempat di mana molekul gas yang belum terbakar berubah alirannya dari arah sejajar sumbu tabung pembakar ke arah luar tegak lurus permukaan batas daerah gelap. Selanjutnya gas yang belum terbakar mendapatkan energi panas sepanjang tebal daerah Preheating Zone (η_0) sampai temperatur nyala (Ignition Temperature : T_i) tercapai dan kemudian bereaksi secara berulang dengan cepat sepanjang tebal daerah Reaction Zone (H_r), diiringi dengan pelepasan energi panas yang lebih besar lagi hingga mencapai temperatur nyala api (Flame Temperature : T_f). Warna dari daerah luminous biasanya berubah menurut rasio udara-bahan bakar yaitu jika rasio campuran kurus (lean mixture) maka warna permukaan kerucut nyala luminous adalah ungu, yang menandakan banyaknya dihasilkan CH radikal. Dan jika rasio campuran kaya bahan bakar (rich mixture), maka permukaan kerucut nyala luminous akan berwarna hijau mendekati kebiruan, yang menandakan banyaknya konsentrasi molekul C_2 .

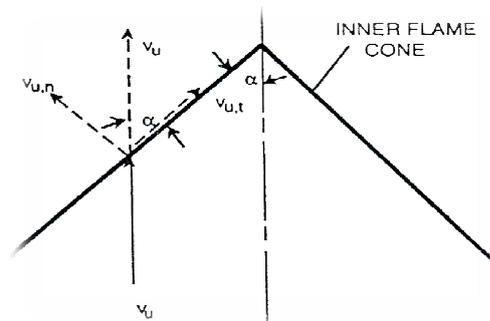


Gambar 5. Struktur Nyala Api Premix

(Sumber : Kenneth K. Kuo, *Principle of Combustion*, Canada)

Gambar di atas menunjukkan secara skematik suatu struktur nyala api yang dihasilkan oleh suatu Bunsen burner. Nyala api khas hasil Bunsen burner adalah nyala rangkap, yaitu inti nyala premix yang kaya akan bahan bakar dikelilingi dengan nyala difusi. Bentuk nyala api sangat ditentukan oleh

kombinasi pengaruh profil kecepatan perambatan nyala api (Flame Propagation) dan pengaruh hilangnya panas ke dinding tabung (Flame Quenching).



Gambar 6. Vektor Diagram Kecepatan Nyala Laminar

(Sumber : Stephen R. Turns. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, Pennsylvania)

Supaya kontur struktur nyala api tidak berubah, maka kecepatan nyala api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari campuran udara-bahan bakar yang belum terbakar pada setiap lokasinya, dan khususnya pada kondisi aliran gas laminar dengan bilangan $Re < 2300$ maka kecepatan nyala api termasuk kecepatan nyala api laminar (SL) tidak dipengaruhi oleh bilangan Reynold dan dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$S_L = V_u \sin \alpha \quad (2.1)$$

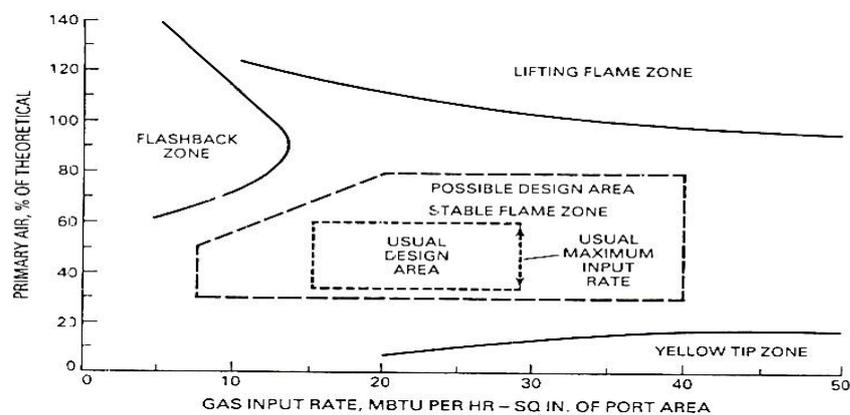
2.12.2 Fenomena Fleshback

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api masuk balik dan merambat kembali ke dalam tabung pembakar, dapat disebut juga sebagai back fire atau light back.

Flashback tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya. Fenomena flashback berhubungan dengan kecepatan nyala laminar lokal dan kecepatan aliran lokal sebanding. Flashback secara umum merupakan kejadian sesaat di mana apabila terjadi, aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan nyala manjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan,

nyala akan membalik atau flashback melalui tabung dan lebih besar dari jarak quenching.

Gambar di bawah menunjukkan daerah stabilitas nyala dengan bahan bakar industri yang berisi hidrogen. Bekerja pada daerah kiri flashback mengakibatkan terjadinya flashback, sementara itu untuk menghindari terjadinya flashback daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 7. Diagram stabilitas flashback, lift-off, dan yellow tipping untuk bahan bakar gas industri

(Sumber : Stephen R. Turns. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, Pennsylvania)

2.12.3 Fenomena Lift OFF

Lift-off adalah kondisi di mana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya flashback, fenomena lift-off juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding. Fenomena nyala api terangkat (lift-off) sangat tergantung pada nyala api lokal dan sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dikatakan menempel. Jika kecepatan dinaikkan,

maka sudut kerucut nyala turun sesuai dengan kondisi $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{S_L}{V_u} \right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke bawah.

Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai liftoff, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

2.12.4 Fenomena Blow OFF

Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini juga sangat dihindari.

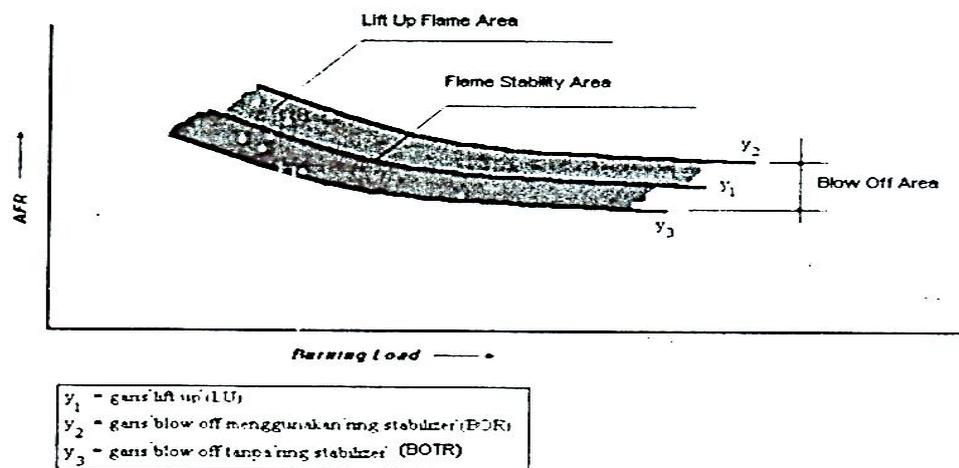
2.12.5 Fenomena Lift-Up

Lift-up dan Daerah Stabilitas Nyala Secara umum daerah stabilitas nyala api adalah daerah yang dibatasi oleh garis lift-off di bagian atas, garis nyala kuning di bagian bawah, dan garis flashback di sisi kiri. Nyala kuning ditunjukkan oleh terbentuknya jelaga di dalam nyala. Daerah stabilitas nyala tersebut merupakan daerah perencanaan, pada grafik antara perbandingan udara-bahan bakar (AFR) dengan laju aliran panas input yang ditunjukkan oleh laju gas mengali tiap luasan area (burning load).

Kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar yang sangat cepat akan cenderung menyebabkan terjadinya blow-off. Penambahan ring stabilizer akan memperlambat kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar di atas ring sehingga nyala api tidak akan langsung padam, melainkan berpindah kedudukan dari mulut barrel menuju ring. Selain itu, penggunaan ring juga dapat menyebabkan terjadinya resirkulasi aliran dingin sehingga nyala tidak akan cepat padam, melainkan akan “mengejar” kembali aliran tersebut dan tetap stabil. Ring stabilizer juga dapat menyimpan panas yang masih memungkinkan terjadi nyala di atas ring tersebut. Fenomena ini disebut fenomena nyala api lift-up. Hal tersebut terjadi karena pada ring kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar

sudah menjadi sama kembali dengan kecepatan nyala. Fenomena nyala lift-up dapat didefinisikan sebagai suatu kondisi di mana nyala terangkat seluruhnya dari mulut barrel dan “duduk” di atas ring stabilizer.

Sementara itu, daerah stabilitas nyala yang berhubungan dengan fenomena nyala lift-up dan blow-off dapat digambarkan ke dalam suatu grafik seperti di bawah ini:



Gambar 8. Grafik Perbandingan AFR dan BL [13]

Semua garis menggambarkan perbandingan antara Air Fuel Ratio (AFR) dan Burning Load (BL) untuk semua fenomena yang terjadi. Garis BOTR (Blowoff Tanpa Ring) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena blowoff terjadi pada percobaan tanpa menggunakan ring stabilizer. Persamaan dari garis ini dinotasikan sebagai y_3 . Garis LU (Lift-up) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena Lift-up terjadi dan persamaan garis ini dinotasikan sebagai y_1 . Sementara itu, garis BOR (Blow-off dengan Ring) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena blow-off terjadi pada percobaan yang menggunakan ring stabilizer. Persamaan garis BOR ini dinotasikan sebagai y_2 . Persamaan y_1 , y_2 , dan y_3 digunakan untuk mencari luas daerah nyala, luas ini menggambarkan energi dan luas ini juga akan menggambarkan apakah terjadi peningkatan stabilitas nyala. Daerah yang berada di antara sumbu X dan garis y_1 dinamakan daerah A1. Daerah yang berada di

antara sumbu X dan garis y2 dinamakan sebagai daerah A2, sedangkan daerah yang berada di antara sumbu X dan garis y3 dinamakan sebagai daerah A3. Luas daerah-daerah ini dapat dicari dengan mengintegalkan persamaannya masing-masing (dengan batas atas dan bawah adalah nilai maksimum dan minimum BL), yaitu:

$$A_i = \int_{BL_{\min}}^{BL_{\max}} (y_i) dx \quad (2.2)$$

Daerah yang berada di antara garis y1 dan y2 dinamakan Lift-up Flame Area yang luasnya merupakan selisih antara A2 dan A1. Daerah yang berada di antara garis y3 dan y2 dinamakan Blow Off Area yang luasnya merupakan selisih antara A2 dan A3. Sementara itu, daerah yang berada di antara garis y3 dan y1 dinamakan Flame Stability Area dan luasnya merupakan selisih antara A1 dan A3. Berikut merupakan persamaan-persamaan yang digunakan untuk mencari deviasi masing-masing daerah:

$$\bullet \text{ Deviasi Lift Up Flame Area (\%)} = \frac{(A2 - A1)}{A1} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\bullet \text{ Deviasi Blow Off Area (\%)} = \frac{(A2 - A3)}{A3} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$\bullet \text{ Deviasi Flame Stability Area (\%)} = \frac{(A1 - A3)}{A3} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.12.6 Tinggi Nyala

Pembakaran bahan bakar gas akan membentuk nyala api, ketika terbakar dengan oksigen di atmosfer, suatu nyala nyata yang merupakan aliran cahaya dari pijaran gas. Nyala api mempunyai bentuk geometri dan dimensi yang diperlukan untuk ketepatan tungku pembakaran atau daerah kerja tungku. Kesalahan dalam optimasi bentuk geometri akan menyebabkan rendahnya efisiensi tungku serta menjadikan umur pakai tungku lebih pendek, berpolusi, dan akibat lainnya.

Tinggi nyala dapat didefinisikan sebagai suatu jarak aksial nyala api dari mulut tabung pembakar sampai kepada suatu titik dimana ujung nyala api tersebut mencapai garis sumbunya.

Persamaan dari Becker dan Liang menghasilkan prediksi yang berlebihan terhadap tinggi nyala rata-rata, demikian pula yang dihasilkan Kalghati yang memodifikasi konstanta persamaan Becker dan Lian. Sedangkan persamaan Hustad dan Sonju lebih difokuskan pada nyala difusi jet yang besar untuk propana dan metana dengan ketinggian visible hingga 8 meter. Sedangkan persamaan yang dihasilkan oleh N.A. Røkke et al memfokuskan persamaannya untuk mengukur tinggi nyala teoritis pada nyala api premix laminar dengan memodifikasi persamaan sebelumnya yang dilakukan oleh Hustad dan Sonju, dengan percobaan propana berdasarkan fraksi massa (Y_f) yang berbeda pada kisaran antara 1,0 hingga 0,15.

Tabel 1. Persamaan tinggi nyala

Becker dan Liang	$\psi = 0,165 + 0,022\xi \quad (1 \leq \xi \leq 11)$ $\xi = \frac{L}{d_0} \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} Fr \right)^{-1/3}, \psi = \left[\frac{46,67 \sqrt{\rho_0 / \rho_x}}{L / d_0} \right]^{2/3}$
Kalghati	$\psi = 0,2 + 0,024\xi \quad (2 \leq \xi \leq 11)$
Hustad dan Sonju	$\frac{L}{d_0} = 27 Fr^{1/5}$
N.A. Røkke et al	$\frac{L}{d_0} = 33 Y_f^{2/5} Fr^{1/5}$

Berdasarkan persamaan-persamaan dari tabel 2.3, tampak bahwa variasi campuran bahan bakar-udara sebagai faktor stabilitas internal yang berperan terhadap tinggi nyala, sedangkan faktor lain yang mempengaruhi stabilitas internal yaitu difusi thermal dalam hal ini akan mempengaruhi laju reaksi pembakaran, difusi massa yang mempengaruhi besar tinggi nyala tidak secara jelas terdapat sebagai faktor penentu tinggi nyala dalam persamaan-persamaan tersebut.

Hasil eksperimen dari N.A. Røkke et al yang menghasilkan sebuah persamaan sederhana seperti pada tabel di atas dapat digunakan untuk

memperkirakan tinggi nyala untuk nyala api premix. Persamaan N.A Røkke et al sebagai berikut:

$$\frac{L}{d_0} = 33Y_f^{2/5} Fr^{-1/5} \quad (2.6)$$

dimana :

L : tinggi nyala (m)

d₀ : diameter keluar

Y_f : fraksi massa bahan bakar (kg bahan bakar/kg total)

Fr : angka Froude (\bar{u}^2 / gd_0)

\bar{u} : kecepatan aliran, $\bar{u} = \frac{(Vg+Vu)}{1/4\pi d^2}$

2.12.7 Kebutuhan Udara Bahan Bakar

Jumlah udara yang dibutuhkan dapat didekati melalui perbandingan kebutuhan udara dan bahan bakar dalam reaksi pembakaran dan melalui pendekatan kandungan karbon dan hydrogen dalam bahan bakar. Untuk pembakaran tuntas dengan jumlah udara teoritis, produk yang dihasilkan terdiri dari karbon dioksida, udara, sulfur dioksida, nitrogen yang menyertai oksigen di dalam udara, dan setiap nitrogen yang terkandung di dalam bahan bakar. Oksigen bebas tidak akan muncul sebagai salah satu produk pembakaran. Jumlah udara actual yang disuplai biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase udara teoritis (Moran, Michael J.,1988).

Proporsi oksigen dan nitrogen dapat diatur dalam udara baik dalam satuan volume maupun dalam satuan berat. Dalam bentuk persentase, proporsinya adalah:

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

Berdasarkan volume : Oksigen = 21% ; Nitrogen = 79%

2.12.8 Kenbutuhan Udara Teoritis

Udara teoritis (stoikiometri) adalah udara minimum yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Dalam prakteknya, kebutuhan udara pembakaran selalu lebih besar dari kebutuhan udara teoritis, dan disebut sebagai udara berlebih (*excess air*).

2.12.9 Rasio Volumetrik

Dua metode fundamental dalam mendefinisikan kuantitas dari suatu campuran adalah berdasarkan beratnya (gravimetrik) atau berdasarkan volumenya (volumetrik). Simbol-simbol yang biasa digunakan antara lain:

x_i = fraksi volumetrik (fraksi mol) dari unsur atau molekul i

ψ_i = fraksi gravimetrik (fraksi massa) dari unsur atau molekul i

Jumlah dari fraksi mol atau fraksi massa untuk semua spesies dalam campuran harus merupakan sebuah kesatuan:

$$\sum_N x_i = \sum_N \psi_i = 1 \quad (2.7)$$

2.12.10 Campuran Udara Bahan Bakar

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

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air-fuelRatio*), FAR (*Fuel-airRatio*), dan Rasio Ekuivalen (Φ).

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

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari

udaradengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai:

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{M_a \dot{N}_a}{M_f \dot{N}_f} \quad (2.8)$$

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

2.16.2 Rasio Bahan Bakar-Udara (Fuel Air Ratio/FAR)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut:

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{M_f \dot{N}_f}{M_a \dot{N}_a} \quad (2.9)$$

2.16.3 Rasio Ekuivalen (Equivalent Ratio, Φ)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (2.10)$$

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (fuel-rich mixture)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (fuellean mixture)

- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

2.16.4 Udara Berlebih (*Excess Air – XSA*)

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

Udara lebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka persentase udara lebih dapat dinyatakan sebagai:

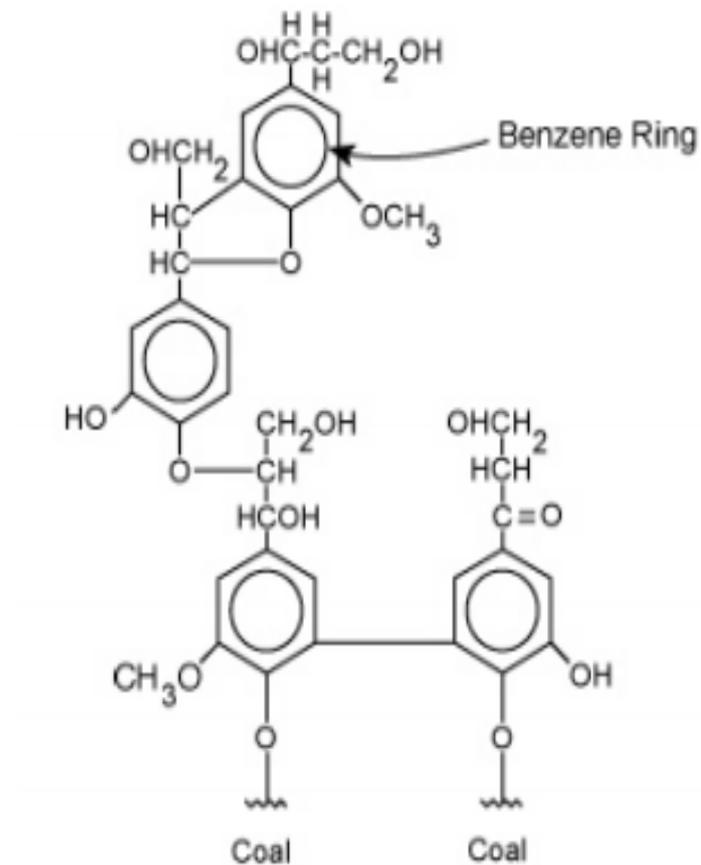
$$\%XSA = \left[\frac{(\chi_{O_2})_{prod}}{(\chi_{N_2})_{prod}/3,76 - (\chi_{N_2})_{prod}} \right] \quad (2.11)$$

Atau,

$$\%XSA = \left[\frac{(N_{O_2})_{prod}}{(N_{N_2})_{prod}/3,76 - (N_{N_2})_{prod}} \right] \quad (2.12)$$

2.13 Batubara Sebagai Bahan Baku

Batu bara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pembatubaraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hydrogen dan oksigen. Batu bara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisis unsur memberikan rumus formula empiris seperti $C_{137}H_{97}O_9NS$ untuk bituminus dan $C_{240}H_{90}O_4NS$ untuk antrasit.



Gambar 9. Rumus bangun batubara (USGS, 2012)

Reaksi pembentukan batubara dapat diperlihatkan sebagai berikut :



Cellulosa lignit gas metana air (Sukandarrumidi,2006)

2.14 Materi Pembentukan Batubara

Hampir seluruh pembentuk batu bara berasal dari tumbuhan. Jenis jenis tumbuhan pembentuk batu bara dan umurnya menurut Diessel (1981) adalah sebagai berikut:

- a. Alga, dari Zaman Pre-kambrium hingga Ordovisium dan bersel tunggal. Sangat sedikit endapan batu bara dari perioda ini.

- b. Silofita, dari Zaman Silur hingga Devon Tengah, merupakan turunan dari alga. Sedikit endapan batu bara dari perioda ini.
- c. Pteridofita, umur Devon Atas hingga Karbon Atas. Materi utama pembentuk batu bara berumur Karbon di Eropa dan Amerika utara. Tetumbuhan tanpa bunga dan biji, berkembang biak dengan spora dan tumbuh di iklim hangat.
- d. Gimnospermae, kurun waktu mulai dari Zaman Permian hingga Kapur Tengah. Tumbuhan heteroseksual, biji terbungkus dalam buah, semisal pinus, mengandung kadar getah (resin) tinggi. Jenis Pteridospermae seperti gangamopteris dan glossopteris adalah penyusun utama batu bara Permian seperti di Australia, India dan Afrika.
- e. Angiospermae, dari Zaman Kapur Atas hingga kini. Jenis tumbuhan modern, buah yang menutupi biji, jantan dan betina dalam satu bunga, kurang bergetah dibanding gimnospermae sehingga, secara umum, kurang dapat terawetkan. (Wahyudiono,2003)

2.15 Kelas dan Jenis-Jenis Batubara

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batu bara umumnya dibagi dalam lima kelas: antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

- a. Antrasit adalah kelas batu bara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (luster) metalik, mengandung antara 86% - 98% unsur Karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.
- b. Bituminous mengandung 68 - 86% unsur Karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Indonesia, tersebar di pulau sumatera, kalimantan dan sulawesi.
- c. Sub-bituminus mengandung sedikit Karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
- d. Lignit atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.

- e. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.

Tabel.2 Kelas dan jenis-jenis batubara

Penggunaan	Nyala (menit)	Nilai Kalori (kal/gr)
Antrasit	5-10	7.222-7.778
Semi antrasit	9-10	5.100-7.237
Bituminous	10-15	4.444-6.111
Sub-bituminus	10-20	4.444-8.333
Lignit	15-20	4.444-8.333

(Sumber : Sukandarrumidi,1995)

2.16 Kualitas Batubara

Batubara yang diperoleh dari penambangan pasti mengandung pengotor (impurities). Penambangan dalam jumlah besar selalu menggunakan alat-alat berat seperti bulldoser, backhole, tractor, dan lainnya.

Impurities terbagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Inherent Impurities

Merupakan pengotor bawaan yang terdapat pada batubara. Batubara yang sudah dicuci (washing) yang di kecilkan ukuran butirannya (crushing) kemudian dibakar dan menyisakan abu. Pengotor ini merupakan pengotor bawaan pada saat pembentukan batubara, pengotor tersebut dapat berupa gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (CaSO_4), pirit (FeS_2), silika (SiO_2) dapat pula berbentuk tulang-tulang binatang (diketahui dari senyawa-senyawa fosfor dari analisis abu). Pengotor bawaan ini tidak mungkin dihilangkan sama sekali, tetapi dapat dikurangi dengan cara pembersihan. Proses ini dikenal dengan teknologi batubara bersih.

2. External impurities.

Merupakan pengotor yang berasal dari luar, timbul pada saat proses penambangan. Dalam menentukan mutu atau kualitas batubara perlu diperhatikan beberapa hal :

a. Calorific Value / Nilai kalor

Dinyatakan dengan kkal/Kg , banyaknya jumlah kalori yang dihasilkan batubara tiap satuan berat (dalam kilogram).

b. Moisture Content (kandungan lengas / air)

Batubara dengan jumlah lengas tinggi akan memerlukan lebih banyak udara primer untuk mengeringkan batubara tersebut agar suhu batubara pada saat keluar dari gilingan tetap, sehingga hasilnya memiliki kualitas yang terjamin. Jenis air sulit untuk dilepaskan tetapi dapat dikurangi, dengan cara memperkecil ukuran butir batubara (Wahyudiono,2006).

c. Ash Content (Kandungan abu)

Komposisi batubara bersifat heterogen ,apabila batubara dibakar maka senyawa organik yang ada akan di ubah menjadi senyawa oksida yang berukuran butiran dalam bentuk abu. Abu dari sisa pembakaran inilah yang dikenal sebagai ash content. Abu ini merupakan kumpulan dari bahan – bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar, atau yang di oksidasi oleh oksigen . Bahan sisa dalam bentuk padatan ini antara lain senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Mn_3O_4 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , SO_3 dan oksida unsur lainnya.

d. Sulfur Content (kandungan belerang)

Belerang yang terdapat pada batubara dalam bentuk senyawa organik dan anorganik, dalam senyawa anorganik dapat dijumpai dalam bentuk mineral pirit (FeS_2 bentuk kristal kubus) , markasit (FeS_2 bentuk kristal orthorombik) atau dalam bentuk sulfat. Sedangkan belerang organik terbentuk selama terjadinya proses coalification . (Krevelen, 1993)

e. Volatile matter (bahan mudah menguap)

Kandungan Volatile matter mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan intensitas nyala api.

f. Fixed Carbon

- g. Didefinisikan sebagai material yang tersisa , setelah berkurangnya moisture , volatile matter dan ash. Hubungan ketiganya sebagai berikut:

$$\text{Fixed Carbon (\%)} = 100\% - \text{Moisture Content} - \text{Ash Content}$$

$$\text{Fixed Carbon} = 100 - \text{Volatile Matter (\%)}$$

- h. Hardgrove Grindability Index (HGI)

Suatu bilangan yang menunjukkan mudah atau sukarnya batubara di giling atau di gerus menjadi bentuk serbuk. Butiran paling halus < 3 mm sedangkan yang paling kasar sampai 50 mm.

- i. Ash Fusion Character of coal

Kualitas batubara adalah sifat fisika dan kimia dari batubara yang mempengaruhi potensi kegunaannya. Kualitas batubara ditentukan oleh maseral dan mineral matter penyusunnya, serta oleh derajat coalification (rank).

Untuk menentukan jenis batubara, digunakan klasifikasi American Society for Testing and Material (ASTM, 1981, op cit Wood et al., 1983)(Tabel 5.2).Klasifikasi ini dibuat berdasarkan jumlah karbon padat dan nilai kalori dalam basis dry, mineral matter free (dmmf). Untuk mengubah basis air dried (adb) menjadi dry, mineral matter free (dmmf) maka digunakan Parr Formulas (ASTM, 1981, op cit Wood et al., 1983) : dimana : FC = % karbon padat (adb) VM = % zat terbang (adb) M = % air total (adb) A = % Abu (adb) S = % sulfur (adb) Btu = british termal unit = 1,8185*CV adb