

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian Batubara

Batubara 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, hidrogen dan oksigen. Pembentukan batu bara berasal dari sisa-sisa tumbuhan yang sudah menjadi fosil dan mengendap selama jutaan tahun. Secara umum, tahapan pembentukan batu bara yaitu:

1. Lapisan tumbuhan menyerap air dan tertekan, membentuk materi cokelat berpori yang disebut gambut.
2. Lapisan sedimen lain menumpuk di atas gambut, menguburnya makin dalam. Tekanan dan panas tinggi mengubah gambut menjadi batu bara cokelat (*lignit*).
3. Panas dan tekanan yang lebih besar mengubah *lignit* menjadi batu bara hitam yang halus (*bitumen*).
4. Bitumen akhirnya menjadi batu bara yang lebih keras dan berkilau (*antrasit*).

Kualitas dan mutu dari setiap endapan batubara ditentukan oleh pengaruh suhu dan tekanan serta lama waktu pembentukan yang disebut sebagai 'maturitas organik'. Proses awalnya gambut berubah menjadi *lignite* (batubara muda) atau '*brown coal* (batubara coklat) ini adalah batubara dengan jenis maturitas organik rendah di bandingkan dengan batubara jenis lainnya. Batubara muda agak lembut dan warnanya bervariasi dari hitam pekat sampai kecoklat-coklatan. Mendapat pengaruh suhu dan tekanan yang terus menerus selama jutaan tahun, batubara muda mengalami perubahan yang secara bertahap menambah maturitas organiknya

dan mengubah batubara muda menjadi batubara '*sub-bitumen*'. Perubahan kimiawi dan fisika terus berlangsung hingga batubara menjadi lebih keras dan warnanya lebih hitam dan membentuk 'bitumen' atau '*antrasiet*'. Dalam kondisi yang tepat, peningkatan maturitas organik yang semakin tinggi terus berlangsung hingga membentuk *antrasit*.

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

1. *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%.
2. *Bituminus* mengandung 68 - 86% unsur karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Australia.
3. Sub-bituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
4. Lignit atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.
5. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.



Sumber: Foto Kegiatan tugas akhir 2019

Foto 3.1
Batubara

3.2 Parameter Kualitas Batubara

Parameter kualitas batubara menggambarkan sifat fisik dan kimia pada batubara dimana sangat mempengaruhi dalam proses perlakuan panas. Adapun beberapa parameter kualitas batubara sebagai berikut:

3.2.1 Air (*Moisture*)

Adapun air yang terkandung dalam batubara terdiri dari dua:

1. Air bawaan (*Inherent Moisture*) merupakan air yang terikat secara fisik pada struktur pori-pori bagian dalam batubara dan memiliki tekanan uap yang lebih rendah daripada tekanan normal.
2. Air bebas (*Free Moisture*) merupakan air yang terikat secara mekanik dengan batubara pada daerah permukaan seperti dalam rekahan. Air bebas ini memiliki tekanan uap normal.

Kandungan air pada batubara memberikan pengaruh negatif pada proses pemanfaatannya karena kadar air yang terlalu tinggi akan menimbulkan masalah dalam proses pembakaran. Adanya kandungan air yang cukup tinggi akan mengurangi kalori batubara pada saat pembakaran. Hal ini dikarenakan terserapnya sebagian panas untuk menguapkan kandungan air yang tinggi dalam batubara. Air yang terkandung dalam batubara terdiri dari air bebas (*free moisture*) dan air bawaan (*inherent moisture*). Air bebas adalah air yang terikat secara mekanik dengan batubara pada permukaan dalam rekahan atau kapiler yang mempunyai tekanan uap normal. Sedangkan air bawaan adalah air yang terikat secara fisik pada struktur pori-pori bagian dalam batubara dan mempunyai tekanan uap yang lebih rendah dibanding dengan tekanan uap normal. Kandungan air dalam batubara baik air bebas maupun air bawaan mempunyai faktor yang merugikan karena memberikan pengaruh yang negative terhadap biaya transportasi dan proses pembakarannya.

Penurunan kadar air dalam batubara dapat dilakukan dengan cara mekanik, sedangkan penurunan kadar air bawaan harus dilakukan dengan cara pemanasan.

Proses pemanasan batubara sampai suhu tertentu menyebabkan terjadinya perubahan komposisi struktur batubara. Dengan memanaskan batubara, terjadi perubahan kimia karena menguapnya air bawaan, dekomposisi gugus karboksil, penyusutan gas-gas hydrogen dan oksigen kompleks serta *aromatisasi*. Komposisi dan sifat produk akhir akan bervariasi tergantung pada suhu pemanasan. Selama proses pemanasan akan terjadi reaksi kimia yang menghasilkan produk gas atau cairan yang banyak berhubungan dengan sistem pori-pori batubara (samsudin, 1996).

Pada suhu 100-120°C terjadi reaksi *endodermis*. Pada reaksi ini terjadi penguapan air, dimana air yang menguap berupa air bebas, air terikat secara fisik dan air yang terjebak dalam struktur pori-pori batubara. Penguapan air bebas akan berperilaku sama dengan pengeringan secara umum, sedangkan penguapan air bawaan dianalogikan dengan air kristal atau *hidroksida*. Dalam melakukan pemanasan batubara terdapat tiga daerah (pemanasan) yang berpengaruh terhadap terjadinya dekomposisi, yaitu pemanasan dibawah suhu dekomposisi, daerah dekomposisi aktif dan pemanasan disaat suhu dekomposisi. Dekomposisi aktif disini adalah terdekomposisinya material penyusun batubara menjadi penguapan air. Menurut Tsai (1982),

Pemanasan batubara pada suhu dekomposisi aktif yaitu >200°C, menyebabkan terjadinya penguapan air bebas, air bawaan/terikat secara kimia, tar, hydrogen, CO₂, CO dan hidrokarbon. pada proses pengeringan batubara dengan suhu pemanasan sekitar 150°C. pengeluaran material dari batubara belum sempurna sehingga perlu ditambah zat *aditif* sebagai penutup permukaan batubara.

3.2.2 Abu (*Ash*)

Abu terdiri dari senyawa- senyawa *silicon*, aluminium, besi, dan kalsium serta sejumlah kecil Na, Ti, K, Mg, Mn, dalam bentuk *silikat*, *oksida*, *sulfat*, dan *posfat*. Abu merupakan residu yang berasal dari *mineral matter* yang tersisa setelah batubara terbakar sempurna. Oleh karena itu semakin tinggi kandungan abu dalam batubara akan semakin berkurang nilai kalor batubara tersebut.

3.2.3 Zat Terbang (*Volatile Matter*)

Zat terbang pada batubara terdiri dari dua yaitu zat terbang mineral (*Volatile Mineral Matter*) dan zat terbang organik (*Volatile Organic Matter*). Zat terbang mineral adalah mineral- mineral yang terbawa bersama batubara karena terbawa sungai, pengendapan, dan penetrasi melalui celah batubara dan terdiri dari mineral anorganik yang menjadi pengotor batubara. Zat terbang organik merupakan senyawa organik yang terbentuk dari tumbuh- tumbuhan sewaktu hidup dalam rawa- rawa dan tidak dapat dipisahkan dari batubara. Biasanya terdiri dari H₂, CO, CH₄, dan sejumlah kecil gas- gas yang tidak mudah terbakar seperti CO₂ dan H₂O.

Zat terbang dalam batubara dapat mempengaruhi proses pemanfaatannya dimana pada proses pembakaran akan mengganggu karakteristik pembakaran. Hal ini akan berpengaruh terhadap berat batubara saat pembakaran dimana dengan kandungan zat terbang yang tinggi akan membuat batubara semakin cepat terbakar dan semakin banyak kehilangan berat. Hal ini dapat dicegah dengan cara memperhatikan pada proses pengeringan dan pelakuan panas.

3.2.4 Karbon Tertambat (*Fixed Carbon*).

Karbon tertambat merupakan karbon yang terdapat pada batubara berupa zat padat. Karbon tertambat ini menjadi komponen utama batubara yang mampu menghasilkan panas pada proses pembakaran. Semakin tinggi kandungan karbon tertambat maka nilai kalor batubara akan semakin meningkat.

3.2.5 Nilai Kalor (*Calorific Value*).

Nilai kalor batubara merupakan sejumlah panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara bahan-bahan yang mudah terbakar seperti karbon, hidrogen, dan sulfur dengan koreksi panas penguraian dan panas karena reaksi eksotermis dan endotermis dari pembakaran unsur-unsur pengotor batubara. Dengan adanya air bawaan dan *mineral matter* maka akan mengurangi nilai kalor yang dihasilkan batubara.

3.3 Proses Pembakaran Batubara

Proses pembakaran batubara, semua zat yang mudah terbakar, akan terbakar dan sisanya akan menjadi abu. Dalam proses pembakaran batubara, tahap-tahap yang terjadi sebagai berikut:

- a. Pemanasan partikel batubara yang berasal dari radiasi, konveksi dan konduksi dari lingkungan;
- b. Pengeluaran zat terbang;
- c. Pencampuran zat terbang dengan oksigen dan reaksi pembakarannya;
- d. Difusi oksigen ke dalam sisa arang dan pembakarannya.

Reaksi pembakaran tersebut adalah reaksi antara oksigen dengan unsur-unsur dalam batubara yang dapat terbakar seperti karbon, hidrogen, nitrogen, dan sulfur, yang akan menghasilkan CO_2 , H_2O , NO dan SO_2 . Sifat kimia dari batubara ditentukan oleh jenis dan jumlah unsur kimia yang terkandung dalam tumbuh-tumbuhan asalnya. Faktor dan kondisi yang menyebabkan perubahan pada batubara yakni bakteri pembusuk, temperatur, tekanan dan waktu. (Sukandarumidi, 1995)

3.4 Gasifikasi

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO , CH_4 , dan H_2) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas antara 20% - 40% udara. Dimana prosesnya menggunakan panas untuk merubah biomassa padat atau padatan berkarbon menjadi gas sintetik “seperti gas alam” yang mudah terbakar. Melalui proses gasifikasi, kita bisa merubah hampir semua bahan organik padat menjadi gas bakar yang bersih. Gas yang dihasilkan pada gasifikasi disebut gas produser yang kandungannya didominasi oleh gas CO , H_2 , dan CH_4 . Perbedaan gasifikasi dengan pembakaran sempurna terletak pada jumlah oksigen yang digunakan dalam proses pembakaran serta produk yang dihasilkan. (Guswendar, 2012).

3.5 Sejarah Gasifikasi

Akhir tahun 1920-an, gas hasil gasifikasi diperoleh dengan oksidasi sebagian (*partial oxidation*) coke dengan udara *terhumidifikasi*. Setelah Carl von Linde mengkomersialkan pemisahan *kriogenik* dari udara selama tahun 1920-an, proses gasifikasi menghasilkan gas sintesis dan hidrogen menggunakan oksigen *blast*, hal ini merupakan tonggak perkembangan proses gasifikasi seperti proses *Winkle fluid-bed* (1926), *Lurgi pressurized gasification* (1931), dan *Koppers-Totzek entrained-flow* (1940-an)

Pada tahun 1950-an, baik *Texaco* dan *Shell oil* mengembangkan proses gasifikasi. Dengan keberadaan gas bumi dan minyak yang banyak pada tahun 1950-an, peran gasifikasi batubara mulai menurun. Menurunnya peran ini bukan hanya disebabkan oleh ketersediaan gas bumi dan minyak yang banyak tetapi juga karena nilai kalor gas bumi dan minyak yang lebih tinggi serta sedikitnya kandungan pengotor bila dibandingkan dengan batubara.

Kemudian awal tahun 1970-an, krisis minyak pun mulai terjadi, sedangkan di pihak lain cadangan batubara masih dalam jumlah yang sangat besar sehingga pengembangan teknologi proses batubara kembali dilirik. Hal ini memicu berbagai teknologi proses alternatif pengembangan penggunaan batubara seperti gasifikasi dan *likuifaksi*. Terdapat juga proses *hidrogenasi* batubara dikonversi secara langsung menjadi metana sebagai pengganti gas bumi atau *Synthetic Natural Gas* (SNG). Karena beroperasi pada tekanan yang tinggi menjadikan proses *hidrogasifikasi* agak sulit untuk dikomersialisasikan.

3.6 Proses Gasifikasi Batubara

Proses gasifikasi batubara merupakan suatu proses untuk mengubah batubara menjadi gas, maka material yang tidak diinginkan yang terkandung dalam batubara seperti senyawa sulfur dan abu, dapat dikurangi dari gas dengan menggunakan metode tertentu sehingga dapat dihasilkan gas bersih dan dapat dialirkan sebagai sumber energi. Pembakaran terjadi saat oksigen yang terkandung dalam udara bereaksi dengan karbon dan hidrogen yang terkandung dalam batubara dan menghasilkan CO₂ dan air serta energi panas. Dalam kondisi normal, dengan pasokan udara yang tepat akan mengkonversi semua energi kimia menjadi energi panas.

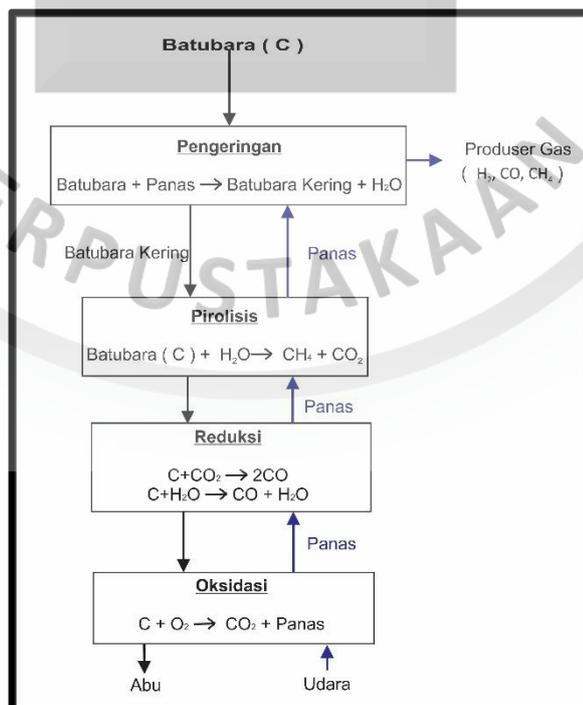
Namun, jika pasokan udara dikurangi, maka pelepasan energi kimia dari batubara akan berkurang, dan kemudian senyawa gas baru akan terbentuk dari proses pembakaran yang tidak sempurna ini (pembakaran setengah matang). Senyawa gas yang terbentuk ini terdiri atas H₂, CO, dan CH₄ (*methana*), yang masih memiliki potensi energi kimia yang belum dilepaskan.

Dalam bentuk gas, potensi energi ini akan lebih mudah dialirkan dan digunakan untuk sumber energi pada proses lainnya, misalnya dibakar dalam boiler,

mesin diesel, gas turbine, atau diproses untuk menjadi bahan sintesis lainnya (menggantikan bahan baku gas alam). Dengan fungsinya yang bisa menggantikan gas alam, maka gas hasil gasifikasi batubara disebut juga dengan *syngas* (*syntetic gas*). Dengan proses lanjutan, *syngas* ini dapat diproses menjadi cairan. Proses ini disebut dengan *coal liquefaction* (pencairan batubara). Untuk dapat menghasilkan gas dari batubara dengan maksimal, maka pasokan oksigen harus dikontrol sehingga panas yang dihasilkan dari pembakaran setengah matang ditambah energi yang terkandung pada senyawa gas yang terbentuk setara dengan energi dari batubara yang dipasok.

3.7 Tahapan Proses Gasifikasi Batubara

Pada proses gasifikasi batubara berdasarkan rentang temperatur dimana prosesnya terdapat empat tahapan yaitu: Pengeringan, Pirolisis, Reduksi dan Oksidasi. Berikut adalah skema gasifikasi.



Sumber: Agung W, Wusan, dkk., 2010,

Gambar 3.1
Skema Gasifikasi Tipe Updraft

3.7.1 Pengerinan

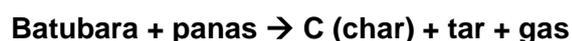
Pengerinan merupakan proses pemanasan batubara, pemanasan ini akan menghilangkan atau menguapkan air yang terkandung dalam batubara. Adapun mekanismenya mengikuti reaksi berikut:



reaksi ini terletak pada bagian paling atas didalam reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah yaitu di bawah 150 °C. Panas yang diperlukan untuk penghilangan kandungan air ini diperoleh dari panas hasil reaksi pembakaran *char* atau reaksi oksidasi karbon dalam *char* dengan oksigen. Air dalam fasa uap ini dapat berreaksi dengan gas lain yang terjadi selama proses gasifikasi. Proses pengerinan dilakukan agar pengapian pada *burner* dapat terjadi lebih cepat dan lebih stabil. Pada reaksi ini, bahan bakar yang mengandung air akan dihilangkan dengan cara diuapkan dan dibutuhkan energi sekitar 2260 KJ untuk melakukan proses tersebut sehingga cukup menyita waktu operasi. (Kurniawan, 2012).

3.7.2 Pirolisis

Pirolisis atau *devolatilisasi* disebut juga sebagai gasifikasi parsial proses ini berlangsung pada temperatur antara 200° – 500° C. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada ($T < 350$ °C) dan terjadi secara cepat ($T > 700$ °C). Mekanisme reaksi pirolisis dapat dijelaskan sebagai berikut:



Selama pirolisis, kelembaban menguap pertama kali (100°C), kemudian *hemiselulosa* terdekomposisi (200-260°C), diikuti oleh *selulosa* (240-340°C) dan *lignin* (280-500°C). Ketika suhu mencapai 500°C, reaksi pirolisis hampir selesai. Oleh karena itu,

Semakin tinggi laju pemanasan semakin mempercepat pembentukan produk yang mudah menguap, meningkatkan tekanan, waktu tinggal yang pendek dari produk yang mudah menguap di dalam reaktor, dan hasil produk cair yang lebih tinggi dinamakan pirolisis cepat atau pirolisis kilat. Produk cair yang menguap mengandung tar dan PAH (*polyaromatic hydrocarbon*). Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , dan CH_4), tar, dan arang

3.7.3 Reduksi

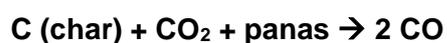
Proses reduksi merupakan tahap utama dari gasifikasi. Pada tahap ini gas mampu bakar dihasilkan. Gas hasil reaksi reduksi ini biasa disebut sebagai gas produser atau *syntetic gas* atau *syngas*. Reaksi-reaksi yang terjadi pada tahap ini sifatnya endothermik. Panas yang dibutuhkan dipasok dari panas hasil reaksi oksidasi. Reaksi-reaksi reduksi pada tahap ini secara *stoikiometri* adalah:

1. Reaksi uap air atau *steam reaction* yaitu reaksi reduksi antara karbon dalam *char* dengan uap air sesuai dengan reaksi berikut:



Reaksi ini menghasilkan produk gas yang mampu bakar (*syngas*). Secara stoikiometri karbon yang berreaksi dengan uap air akan menjadi gas karbon monoksida dan gas hidrogen. Kedua gas ini merupakan komponen utama dari hasil gasifikasi.

2. Reaksi karbon dengan gas karbon dioksida pada tahap ini akan mengikuti reaksi berikut:



Reaksi ini menghasilkan produk gas yang mampu bakar yaitu gas karbon monoksida. Karbon dalam *char* yang bereaksi dengan gas karbon dioksida akan

dikonversi menjadi gas mampu bakar karbon monoksida. Reaksi ini biasa disebut sebagai *Boudouard reaction*.

3. Reaksi Geser atau *Shift Reaction*, Uap air yang ditambahkan akan bereaksi dengan gas CO membentuk gas CO₂ sesuai dengan reaksi berikut:



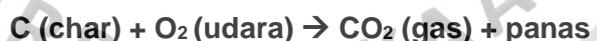
Kedua Produk gas yang dihasilkan ini merupakan gas yang memiliki nilai mampu bakar.

3.7.4 Oksidasi

Proses oksidasi merupakan reaksi yang melibatkan reaktan oksigen sebagai oksidatornya. Karbon dalam *char* akan dioksidasi menjadi gas karbon dioksida atau karbon monoksida. Produk gas yang dihasilkan tergantung pada jumlah oksigen yang ditambahkan. Reaksi oksidasi yang terjadi antara karbon dengan gas oksigen sesuai reaksi berikut:

1. Pembakaran sempurna

Pembakaran sempurna dari karbon dengan oksigen akan sesuai dengan reaksi berikut:



Gas karbon dioksida dihasilkan ketika reaksi oksidasi berjalan sesuai dengan stoikiometri pembakaran sempurna. Reaksi pembakaran sempurna berjalan ketika satu mol karbon dibakar dengan satu mol oksigen dan menghasilkan satu mol gas karbon dioksida. Artinya, karbon dalam *char* yang bereaksi dengan oksigen hanya akan membentuk gas karbon dioksida. Gas hasil pembakaran sempurna tidak memiliki nilai bakar atau tidak mampu bakar, sehingga reaksi ini tidak diharapkan terjadi.

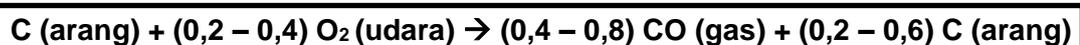
2. Pembakaran tidak sempurna

Pembakaran tidak sempurna terjadi ketika jumlah oksigen kurang dari nilai stoikiometri pembakaran sempurna. Reaksi oksidasi karbon dalam batubara menjadi tidak sempurna ketika satu mol karbon direaksikan dengan oksigen kurang daripada satu mol. Reaksi pembakaran satu mol karbon dengan oksigen yang hanya memenuhi separuh dari kebutuhan stoikiometrinya akan menghasilkan produk berupa satu mol gas karbon monoksida sesuai reaksi berikut:



Persamaan reaksi ini merupakan reaksi yang secara stoikiometri merubah seluruh karbon yang bereaksi dengan oksigen menjadi produk yang hanya terdiri dari gas karbon monoksida. Setiap kelebihan oksigen dari 0,5 mol dapat merubah reaksi dan membentuk gas karbon dioksida. Sebaliknya, jika oksigen kurang daripada 0,5 mol, maka akan menyebabkan sebagian karbon tidak bereaksi. Ada sisa karbon char. Gas hasil reaksi pembakaran tidak sempurna menghasilkan gas yang memiliki nilai bakar atau mampu bakar. Reaksi oksidasi atau pembakaran adalah reaksi yang menghasilkan sumber panas yang dibutuhkan bagi proses gasifikasi secara keseluruhan. Reaksi-reaksi lainnya merupakan reaksi yang dapat diatur untuk mendapatkan gas sesuai dengan komposisi gas yang diinginkan seperti:

- a. Proses gasifikasi umumnya menggunakan 20% sampai 40% oksigen dari nilai stoikiometri proses pembakaran sempurna, reaksi ini menghasilkan karbon tersisa. Proses pembakarannya akan mengikuti reaksi berikut:



- b. Sisa karbon ini dapat direaksikan dengan uap air. Secara stoikimetri prosesnya akan memenuhi reaksi berikut:



- c. Reaksi sisa karbon dengan uap air, dapat menghasilkan gas karbon monoksida dan gas hidrogen. Gas hidrogen merupakan gas yang memiliki nilai pembakaran. Namun demikian, uap air yang ditambahkan dapat pula berreaksi dengan gas hasil proses reaksi sebelumnya. Uap air dapat berreaksi dengan gas karbon monoksida menghasilkan gas karbon dioksida dan gas hidrogen sesuai reaksi stoikiometri berikut:



- d. Reaksi ini biasa disebut dengan *shift reaction* atau reaksi geser. Reaksi yang dapat menggeser karbon monoksida dan uap air menjadi gas karbon dioksida dan hidrogen. Selain dengan uap air, karbon sisa dapat juga berreaksi dengan gas karbon dioksida sesuai reaksi stoikiometri berikut:



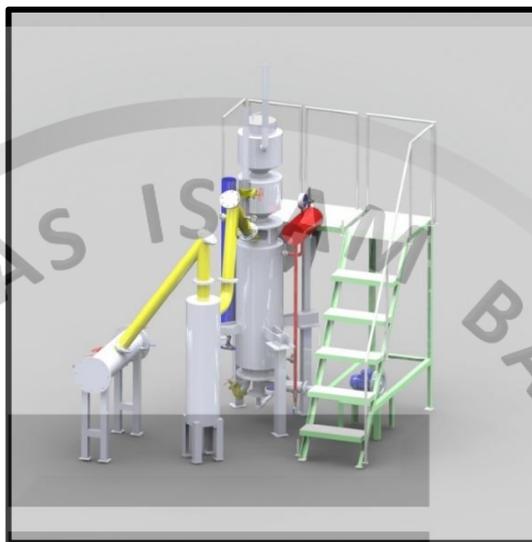
Pada Reaksi ini, karbon dikonversi oleh gas CO_2 menjadi gas yang memiliki nilai mampu bakar yaitu gas CO.

3.8 Teknologi Gasifikasi

Terdapat beberapa macam variasi dari teknologi gasifikasi Berdasarkan *gasifying agent* yang diperlukan, terdapat gasifikasi udara dan gasifikasi oksigen/uap. Gasifikasi udara adalah metode dimana gas yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah udara. Sedangkan pada gasifikasi uap, gas yang digunakan pada proses yang terjadi adalah uap.

Berdasarkan mode fluidisasinya yaitu gasifikasi unggun tetap (*fixed gasification*), gasifikasi unggun bergerak (*moving bed gasification*), gasifikasi unggun

terfluidasi (*fluidized bed gasification*), dan entrained bed. Sampai saat ini yang digunakan untuk skala proses gasifikasi skala kecil adalah mode gasifier unggun tetap. (Reed and Das, 1988).



Sumber: Dokumen penelitian tekMIRA 2019

Gambar 3.2

Alat Gasifikasi Unggun Tetap Tipe *Updraft*

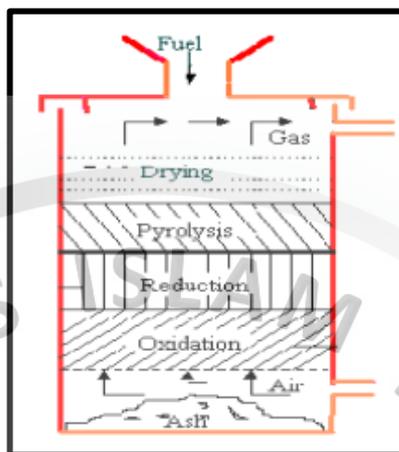
Fixed Bed Gasifier merupakan reaktor gasifikasi unggun tetap berbentuk vertikal. *Gasifier* jenis ini digunakan untuk mempertahankan aliran padatan dengan kecepatan gas rendah. Aliran bahan bakar *gasifier* jenis ini adalah *counter current*, bahan bakar dimasukkan dari bagian atas *gasifier* dan gas (*steam* dan oksigen atau udara) dimasukkan dari bagian bawah *gasifier*. Bahan bakar yang akan diolah ditumpuk di dalam reaktor dan disangga dengan *grate*. Bahan bakar tersebut akan dipanaskan dan dikeringkan oleh gas produser hasil gasifikasi yang akan keluar dari *gasifier*. Penggasifikasian bahan bakar tersebut akan menghasilkan abu dan gas produser beserta produk samping (residu) berupa tar. Abu (kerak atau *molten slag*) dan tar diambil dari bagian bawah *gasifier* sedangkan gas produser yang dihasilkan diambil pada bagian atas *gasifier*. Ciri khas gasifier ini adalah perbedaan temperatur pada berbagai tempat di dalam gasifier dan beroperasi pada tekanan tinggi. Temperatur maksimum yang dapat dicapai pada gasifier jenis ini adalah 930 – 1430

$^{\circ}\text{C}$. Suhu keluaran yang dihasilkan dari gasifier ini berkisar antara 315 – 550 $^{\circ}\text{C}$ dengan residence time 1 – 2 jam (Donald, 1998). Berdasarkan arah aliran, fixed bed gasifier dapat dibedakan menjadi reaktor aliran berlawanan (*updraft gasifier*), reaktor aliran searah (*downdraft gasifier*) dan reaktor aliran menyilang (*crossdraft gasifier*). (Hantoko, dkk.,2011).

1. Fixed Bed Updraft Gasifier

Pada gasifier jenis ini, udara masuk melalui arah bagian bawah gasifier melalui grate dan mengoksidasi arang secara parsial untuk menghasilkan CO dan H₂ (jika digunakan uap) dan ditambah N₂ (jika digunakan udara). Gas ini kemudian bertemu dengan biomassa. Gas yang sangat panas tersebut *mempirolisasi* biomassa, menghasilkan karbon padatan (arang), uap air dan 10-20% uap minyak pada temperatur 100-4000 C, tergantung pada kadar air biomassa. Selanjutnya arang akan dioksidasi parsial oleh udara dan menghasilkan gas. Aliran udara ini berlawanan arah (*counter current*) dengan aliran bahan bakar yang masuk dari bagian atas gasifier. Gas produser yang dihasilkan keluar melalui bagian atas gasifier sedangkan abu diambil pada bagian bawah gasifier. Reaksi pembakaran pada gasifier ini terjadi di dekat *grate* kemudian diikuti reaksi reduksi (proses gasifikasi). Reaksi reduksi tersebut akan menghasilkan gas bertemperatur tinggi. Gas hasil reaksi (gas produser) tersebut bergerak ke bagian atas gasifier menembus unggun bahan bakar menuju daerah yang bertemperatur lebih rendah. Pada saat menembus unggun bahan bakar, gas produser akan kontak dengan bahan bakar yang turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pertukaran panas antara gas dan bahan bakar. Panas *sensible* yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Proses pirolisis dan pengeringan tersebut terjadi pada bagian teratas gasifier. *Updraft gasifier*

mencapai efisiensi tertinggi ketika gas panas yang dihasilkan meninggalkan *gasifier* pada temperatur rendah



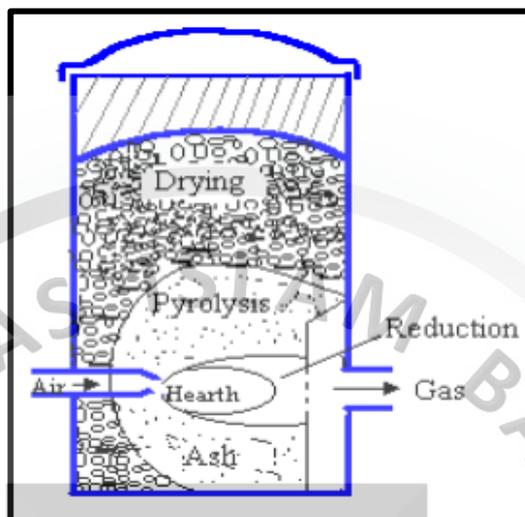
Sumber: (Tasliman, 2008 diambil dari Turare, 1997)

Gambar 3.3
Updraft Gasifier

2 Fixed Bed Crossdraft Gasifier

Crossdraft gasifier merupakan jenis gasifier yang khusus dirancang untuk arang (*charcoal*). *Gasifier* ini tidak ideal karena *gasifier* jenis ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah: proses hanya ditujukan untuk arang kualitas tinggi, temperatur gas keluaran *gasifier* tinggi, CO_2 yang tereduksi rendah, dan kecepatan gas tinggi. Hal ini disebabkan oleh *design crossdraft gasifier* yang penempatan penyimpanan abu, zona pembakaran dan pereduksiannya terpisah. Karakteristik *design* seperti ini menyebabkan jenis bahan bakar yang dapat digunakan terbatas hanya pada bahan bakar yang berkadar abu sedikit, seperti kayu, arang, dan batu karang. Berdasarkan *concentrated partial zones* yang beroperasi pada temperatur lebih besar daripada 2000°C kemampuan muatan *crossdraft gasifier* cukup baik. Waktu yang dibutuhkan untuk *start up* lebih singkat daripada *gasifier* jenis *downdraft* dan *updraft*, yaitu sekitar 5 – 10 menit. Temperatur tinggi pada gasifier ini memiliki efek yang nyata terhadap komposisi

gas. Gasifier jenis ini akan beroperasi dengan baik pada aliran udara dan bahan bakar yang kering. Gasifier ini cocok untuk dioperasikan pada skala kecil.



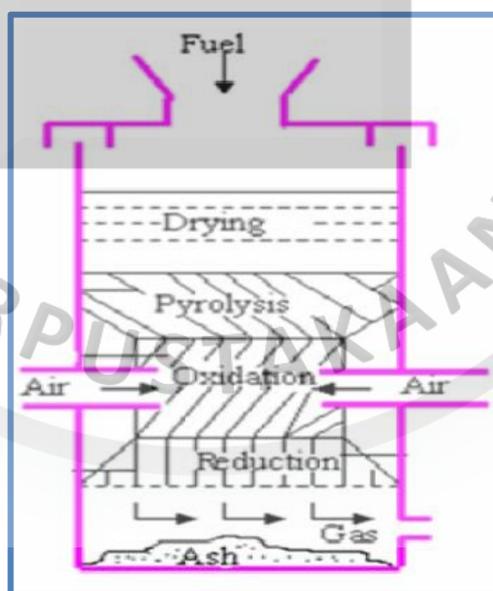
Sumber: (Tasliman, 2008 diambil dari Turare, 1997)

Gambar 3.4
Crossdraft Gasifier

3. Fixed Bed Downdraft Gasifier

Downdraft gasifier dirancang untuk membatasi kandungan minyak dan tar yang terbawa bersama gas produser. Pada *downdraft gasifier*, udara dimasukkan ke dalam aliran bahan bakar padat (*packed bed*) pada atau di atas zona oksidasi. Aliran udara ini searah (*co-current*) dengan aliran bahan bakar yang masuk ke dalam *gasifier*. Bahan bakar dimasukkan pada bagian atas *gasifier*. Bahan bakar tersebut akan mengalami proses pengeringan dan pirolisis akibat panas yang dihasilkan pada reaksi oksidasi. Pada tahap pirolisis bahan bakar, dihasilkan uap dan tar. Uap dan tar yang dihasilkan tersebut akan melalui unggun arang panas dan mengalami perengkahan menjadi gas yang lebih sederhana atau arang. Perengkahan ini menghasilkan pembakaran stabil yang menjaga temperatur pada 800 – 1000 °C. Jika temperatur naik (melebihi rentang temperatur tersebut) maka reaksi endotermik akan mendominasi dan mendinginkan gas, dan jika temperatur turun (kurang dari rentang temperatur tersebut) maka reaksi *eksotermik* akan

mendominasi dan menjaga gas agar tetap panas. Tahap selanjutnya adalah reaksi reduksi. Reaksi reduksi terjadi pada zona dekat dengan *grate*. Pada tahap ini, gas produser dihasilkan. Gas produser yang dihasilkan akan tertarik keluar menuju bagian bawah *gasifier*. Udara masuk menyebabkan pirolisis (*flaming pyrolysis*) biomassa. Proses ini mengkonsumsi uap - uap minyak dan menghasilkan gas reduksi partial CO, CO₂, H₂ dan H₂O, serta sedikit metan sekitar 0,1%. Gas panas bereaksi dengan arang untuk mereduksi gas lebih lanjut dan meninggalkan sekitar 2-5% abu arang. *gasifer* Unggun Tetap Aliran Kebawah (*downdraft gasifier*) menghasilkan gas produser relatif bersih dengan kandungan tar dan partikel yang kecil sehingga sangat sesuai untuk mesin pembakaran dalam, ketel dan turbin (Robert Manurung, 1981). Sedangkan M.S Roa menegaskan *fixed bed* tipe ini merupakan jenis *gasifier* yang sederhana, memiliki nilai *realible* tinggi, dan memungkinkan berbagai *feedstock* dengan partikel rendah pada gas produser.



Sumber: (Tasliman, 2008 diambil dari Turare, 1997)

Gambar 3.5
Downdraft Gasifier

3.9 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Gasifikasi

1. Properti Biomassa

Tidak semua biomassa dapat dikonversikan dengan proses gasifikasi karena ada beberapa klasifikasi dalam mendefinisikan bahan baku yang dipakai pada sistem gasifikasi berdasarkan kandungan dan sifat yang dimilikinya. Pendefinisian bahan baku gasifikasi ini dimaksudkan untuk membedakan antara bahan baku yang baik dan yang kurang baik. Adapun beberapa parameter yang dipakai untuk mengklarifikasinya yaitu:

a. Kandungan Energi

Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa maka producer gas hasil gasifikasi biomassa tersebut semakin tinggi karena energi yang dapat dikonversi juga semakin tinggi.

b. *Moisture*

Bahan baku yang digunakan untuk proses gasifikasi umumnya diharapkan bermoistur rendah. Apabila kandungan *moisture* yang tinggi menyebabkan *heat loss* yang berlebihan. Selain itu, kandungan *moisture* yang tinggi juga menyebabkan beban pendinginan semakin tinggi karena *pressure drop* yang terjadi meningkat. Idealnya kandungan *moisture* yang sesuai untuk bahan baku gasifikasi kurang dari 20 %.

c. Debu

Semua bahan baku gasifikasi menghasilkan *dust* (debu). Adanya *dust* ini sangat mengganggu karena berpotensi menyumbat saluran sehingga membutuhkan *maintenance* lebih. Desain *gasifier* yang baik setidaknya menghasilkan kandungan *dust* yang tidak lebih dari 2 – 6 g/m³.

d. Tar

Tar merupakan salah satu kandungan yang paling merugikan dan harus dihindari karena sifatnya yang korosif. Tar adalah cairan hitam kental yang terbentuk dari *destilasi destruktif* pada material organik. Selain itu, tar memiliki bau yang tajam dan dapat mengganggu pernapasan. Pada reaktor gasifikasi terbentuknya tar, yang memiliki bentuk *approximate atomic* $\text{CH}_{1.2}\text{O}_{0.5}$, terjadi pada temperatur pirolisis yang kemudian terkondensasi dalam bentuk asap, namun pada beberapa kejadian tar dapat berupa zat cair pada temperatur yang lebih rendah. Apabila hasil gas yang mengandung tar relatif tinggi dipakai pada kendaraan bermotor, dapat menimbulkan deposit pada karburator dan *intake valve* sehingga menyebabkan gangguan. Desain *gasifier* yang baik setidaknya menghasilkan tar tidak lebih dari 1 g/m^3 . Batas kandungan pengotor tar pada *engine* yaitu $< 100 \text{ mg/Nm}^3$. Untuk tipe *gasifiers fixed bed updraft* diperkirakan tar yang terbentuk mencapai 150 g/Nm^3 . Sehingga *producer gas raw* pada *gasifier* masih perlu dilakukan *treatment* penghilangan tar.

e. Ash dan Slagging

Ash adalah kandungan mineral yang terdapat pada bahan baku yang tetap berupa oksida setelah proses pembakaran. Sedangkan *slag* adalah kumpulan *ash* yang lebih tebal. Pengaruh adanya ash dan slag pada *gasifier* adalah:

- Menimbulkan penyumbatan pada *gasifier*;
- Pada titik tertentu mengurangi respon pereaksian bahan baku.

f. Kadar Air

Kadar air dari bahan bakar mempengaruhi suhu reaksi karena energi diperlukan untuk menguapkan air dalam bahan bakar. Oleh karena itu, proses gasifikasi berlangsung pada suhu rendah

2. Suhu *Bed*

Tingkat gasifikasi serta kinerja keseluruhan gasifier adalah tergantung suhu. Semua reaksi gasifikasi biasanya *reversibel* dan titik *ekuilibrium* dari setiap reaksi dapat digeser dengan mengubah suhu.

3. Tekanan *Bed*

Tekanan *Bed* telah dilaporkan memiliki efek yang signifikan pada proses gasifikasi. Penurunan berat selama *devolatilization residu* tanaman di N_2 suasana di $815^\circ C$, menurun dengan peningkatan tekanan. Namun, pada suhu konstan, konstanta laju orde pertama (k) untuk gasifikasi arang meningkat karena tekanan meningkat. Menggunakan media gasifikasi 50:50 H_2O / N_2 pada suhu $815^\circ C$, nilai-nilai konstanta laju (k) untuk char kayu adalah 0,101, 1,212 dan 0,201 min^{-1} , masing-masing pada tekanan 0,17, 0,79 dan 2,17 MPa. (Nandi dan Onischak. 1985)

4. Tinggi *Bed*

Pada suhu reaktor tertentu, waktu tinggal yang lebih lama (karena ketinggian *bed* yang lebih tinggi) meningkat berjumlah hasil gas. Ketinggian *bed* yang lebih tinggi menghasilkan lebih efisiensi konversi serta suhu *bed* lebih rendah karena efek *fly-wheel bed material*. Efek *fly-wheel* berkurang secara signifikan ketika jumlah bahan *bed* berkurang sehingga menghasilkan suhu *bed* yang lebih tinggi. (Sadaka *et al.*1998)

5. Kecepatan fluidisasi

Kecepatan fluidisasi memainkan peran penting dalam pencampuran partikel dalam *fluidized bed*. Dalam sistem gasifikasi udara, semakin tinggi kecepatan fluidisasi semakin tinggi suhu *bed* dan semakin rendah menghasilkan nilai kalor gas akibat peningkatan jumlah oksigen dan nitrogen dalam gas *inlet* ke *system*

6. Rasio Kesetaraan

Rasio kesetaraan memiliki pengaruh kuat pada kinerja *gasifier* karena itu mempengaruhi suhu *bed*, kualitas gas, dan efisiensi termal. Peningkatan rasio kesetaraan mengakibatkan tekanan rendah baik di *bed* padat dan daerah *reeboard* ketika *gasifier* dioperasikan pada kecepatan fluidisasi yang berbeda dan ketinggian *bed*.

7. Ukuran partikel

Ukuran partikel secara signifikan mempengaruhi hasil gasifikasi. Ukuran partikel kasar akan menghasilkan lebih banyak tar dan kurang tar yang mereka hasilkan. Tingkat *difusi* termal dalam partikel menurun dengan peningkatan ukuran partikel, sehingga mengakibatkan tingkat pemanasan yang lebih rendah. Untuk diberikan suhu, hasil gas yang dihasilkan dan komposisi meningkat dengan penurunan ukuran partikel.

8. Rasio udara dan uap

Meningkatkan rasio udara dan uap akan meningkatkan nilai kalor gas sampai optimum. Menggunakan campuran udara-uap alam proses gasifikasi batubara dalam *fluidized bed reaktor*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh rasio uap dan udara pada arang terutama pada rasio yang lebih rendah karena fakta bahwa uap digunakan pada tahap *devolatilisasi* memberikan kontribusi terhadap proses gasifikasi bahkan dalam kasus ketika uap tidak ditambahkan. Ketika rasio uap air meningkat, nilai kalor meningkat, mencapai puncaknya pada 0,25 kg / kg. (Tomeczek *et al.* 1987)

9. Ada Tidaknya Katalis

Katalis komersial dan non-komersial diuji dalam berbagai proses gasifikasi. Salah satu masalah utama dalam *steam* katalitik tar adalah endapan karbon pada katalis

dari karakter aromatik karbon yang tinggi. Berbagai katalis yang digunakan untuk meningkatkan kualitas produksi gas dan mengurangi tingkat produksi tar.

3.10 Parameter-Parameter Gasifikasi

1. Temperatur Gasifikasi

Temperatur gasifikasi harus tinggi karena dalam tahap pertama gasifikasi adalah pengeringan untuk menguapkan kandungan air dalam bahan bakar berupa biomassa padat agar menghasilkan gas yang bersih. Temperatur yang tinggi juga dapat berpengaruh dalam menghasilkan gas yang mudah terbakar. Untuk mempertahankan temperatur, maka tangki reaktor diisolasi dengan bahan tahan api agar tidak ada panas yang keluar ke lingkungan sehingga efisiensi reaktor menjadi baik.

2. *Specific Gasification Rate* (SGR)

SGR mengindikasikan banyaknya biomassa rata-rata yang dapat tergasifikasi dalam *gasifier*. Jika SGR semakin besar maka proses gasifikasi tidak berjalan secara sempurna, sebaliknya jika SGR semakin kecil maka proses gasifikasi berjalan lambat. SGR dapat dihitung dengan cara:

$$SGR = \frac{\text{berat biomassa} - \text{berat arang}}{\text{luas} \times \text{waktu}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{dt}} \right)$$

3. *Fuel Consumption Rate* (FCR)

Energi input ini mengacu pada jumlah energi yang diperlukan dalam hal bahan bakar yang akan dimasukkan ke dalam *gasifier*. Dalam menentukan energi input kita harus tau terlebih dahulu energi yang dibutuhkan. Hal ini mengacu pada jumlah panas yang harus dipasok dan dapat ditentukan berdasarkan jumlah bahan

bakar yang digunakan dalam proses gasifikasi. Jumlah energi yang diperlukan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Q_n = \frac{M_f \times E_s}{T}$$

Dimana:

Q_n = energi yang dibutuhkan (kcal/hr)

M_f = massa (kg)

E_s = *energy spesifik* (kcal/kg)

T = waktu proses (hr)

Untuk memperoleh energi yang dibutuhkan perlu adanya perhitungan mengenai laju konsumsi bahan bakar agar kebutuhan energi tersebut dapat dipenuhi dengan menggunakan rumus:

$$FCR = \frac{Q_n}{HV_f \times \xi_g} \quad \text{Atau} \quad FCR = \frac{\text{berat biomassa (kg)}}{\text{waktu oprasional (dt)}}$$

Dimana:

FCR = *fuel consumption rate* (kg/hr)

Q_n = *heat energy needed*, Kcal/hr

HV_f = *heating value of fuel*, Kcal/kg

ξ_g = *efisiensi gasifier*

4. Gas Fuel Ratio (GFR).

GFR (*Gas Fuel Ratio*) dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$GFR = \frac{\text{laju aliran gas producer}}{FCR}$$

5. % Char

% Char adalah perbandingan banyaknya arang yang dihasilkan dengan banyaknya biomassa yang dibutuhkan. % char dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\% \text{ char} = \frac{\text{arang}}{\text{berat biomassa}} \times 100\%$$

6. Waktu Konsumsi Bahan Bakar

Hal ini mengacu pada total waktu yang dibutuhkan untuk benar-benar mengubah menjadi gas dari bahan bakar padat di dalam reaktor. Ini termasuk waktu untuk menyalakan bahan bakar dan waktu untuk menghasilkan gas, ditambah waktu untuk benar-benar membakar semua bahan bakar dalam reaktor. Kepadatan dari bahan bakar padat (ρ), volume reaktor (V_r), dan konsumsi bahan bakar tingkat (FCR) adalah faktor yang digunakan dalam menentukan total waktu untuk mengkonsumsi bahan bakar padat dalam reaktor. Seperti ditunjukkan di bawah, ini dapat dihitung menggunakan rumus:

$$t = \frac{\rho \times V_r}{FCR}$$

Dimana:

FCR = *Fuel Consumption Rate* (kg/hr)

t = Waktu konsumsi bahan baku (hr)

ρ = Massa jenis bahan baku (kg/m³)

V_r = Volume reaktor (m³)

7. Air Fuel Ratio (AFR)

AFR adalah tingkat aliran udara primer yang masuk ke reaktor. Hal ini mengacu pada laju aliran udara yang diperlukan untuk mengubah bahan bakar padat

menjadi gas. Hal ini sangat penting dalam menentukan ukuran kipas angin atau blower yang dibutuhkan untuk reaktor. Ini dapat ditentukan dengan menggunakan tingkat konsumsi bahan bakar (FCR), udara stoikiometri dari bahan bakar (SA), dan rasio ekuivalensi (ϵ) untuk *gasifying* 0,3 sampai 0,4. dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$AFR = \frac{\epsilon_u \times FCR \times SA}{\rho_a}$$

Dimana:

AFR = *Air fuel rate* (tingkat aliran udara), (m^3/jam)

FCR = *fuel consumption rate* (kg/jam)

ρ_a = massa jenis udara = 1,25 (kg/m^3)

ϵ_u = rasio ekuivalensi (0,3 - 0,4) = 0,35

SA = udara stoikiometri dari bahan bakar padat

8. *Oxygen Fuel Rate* (OFR)

OFR adalah jumlah laju aliran massa oksigen yang dibutuhkan dalam proses gasifikasi. Dimana udara bebas terdiri dari 78% Nitrogen, 21% Oksigen, dan 1% Uap Air. Berdasarkan kandungan oksigen pada udara bebas maka kita dapat menyimpulkan rumus untuk menentukan OFR adalah sebagai berikut:

$$OFR = \frac{\epsilon_o \times FCR \times SA}{\rho_o}$$

Dimana:

OFR = *Oxygen fuel rate* (tingkat aliran udara), (m^3/jam)

FCR = *fuel consumption rate* (kg/jam)

ρ_o = massa jenis oksigen = 1,43 (kg/m^3)

ϵ_o = ratio ekuivalensi udara x kandungan oksigen di dalam udara

$$= 0,35 \times 0,21 = 0,0735$$

SA = udara stoikiometri dari bahan bakar padat pada proses gasifikasi

9. Air Fuel Ratio Stoichiometric (AFR_{stoich})

AFR_{stoich} adalah nilai kebutuhan udara untuk terjadinya pembakaran sempurna pada suatu unsur dan untuk mendapatkan nilai AFR_{stoich} berdasarkan data analisis ultimate maka dapat dihitung perbandingan udara dan bahan bakar dinyatakan dalam kg udara per kg bahan bakar atau g mol udara per kg mol bahan bakar. Pada proses pembakaran sempurna, maka unsur-unsur kimia batubara berupa C, H₂ dan S bereaksi dengan O₂, sedangkan N₂ tidak bereaksi dengan O₂.

10. Equivalen Ratio (ER)

Kebutuhan jumlah udara gasifikasi selalu lebih kecil daripada kebutuhan jumlah udara stoikiometri (pembakaran sempurna). Jumlah udara gasifikasi sangat tergantung pada reaksi pembakaran masing-masing unsur yang terkandung dalam satuan massa bahan bakar dengan udara secara sempurna dan *Equivalence Ratio* (ER). Dimana *rasio equivalent* (ER) merupakan parameter penting dalam pengoperasian dari gasifier (*Raman, dkk., 2013*). Nilai ER akan berpengaruh pada kuantitas dan kualitas gas yang dihasilkan. Pada proses gasifikasi diperlukan jumlah udara dalam jumlah yang terbatas. Nilai ER yang terlalu tinggi dan rendah akan menimbulkan beberapa persoalan. Jika nilai ER yang terlalu kecil maka mengakibatkan bertambahnya produk char, produksi gas mampu bakar yang kecil serta panas kalor yang rendah. Sebaliknya nilai ER yang tinggi akan meningkatkan gas CO₂ dan H₂O akibat kelebihan suplai udara sehingga proses pembakaran mendekati pembakaran sempurna (*Atnawa, dkk., 2013*).

$$ER = \frac{AFR \text{ Aktual}}{AFR \text{ Stoich}}$$