

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Batubara

Batubara adalah sisa tumbuhan dari jaman prasejarah yang berubah bentuk yang awalnya berakumulasi di rawa dan lahan gambut. Penimbunan lanau dan sedimen lainnya, bersama dengan pergeseran kerak bumi (dikenal sebagai pergeseran tektonik) mengubur rawa dan gambut yang seringkali sampai ke kedalaman yang sangat dalam. Dengan penimbunan tersebut, material tumbuhan tersebut terkena suhu dan tekanan yang tinggi. Suhu dan tekanan yang tinggi tersebut menyebabkan tumbuhan tersebut mengalami proses perubahan fisika dan kimiawi dan mengubah tumbuhan tersebut menjadi gambut dan kemudian batu bara. Pembentukan batubara dimulai sejak carboniferous period (periode pembentukan karbon atau batu bara) dikenal sebagai zaman batu bara pertama – yang berlangsung antara 360 juta sampai 290 juta tahun yang lalu. Mutu dari setiap endapan batu bara ditentukan oleh suhu dan tekanan serta lama waktu pembentukan, yang disebut sebagai ‘maturitas organik’. Batubara dibedakan menjadi berbagai jenis tergantung kepada suhu dan tekanan seperti yang telah disebutkan di atas.

2.1.1 Jenis-Jenis Batubara

Adapun jenis-jenis batubara adalah :

a. Gambut (peat)

Golongan ini sebenarnya belum termasuk jenis batubara, tapi merupakan bahan bakar. Gambar 2.1 menunjukkan bahwa gambut merupakan fase awal dari proses pembentukan batubara. Endapan ini masih memperlihatkan sifat awal dari bahan dasarnya (tumbuh-tumbuhan).

b. Lignite

Golongan ini sudah memperlihatkan proses selanjutnya berupa struktur kekar dan gejala pelapisan. Apabila dikeringkan, maka gas dan airnya akan keluar. Endapan ini bisa dimanfaatkan secara terbatas untuk kepentingan yang bersifat sederhana, karena panas yang dikeluarkan sangat rendah.

c. Sub-Bituminous (Bitumen Menengah)

Golongan ini memperlihatkan ciri-ciri tertentu yaitu warna yang kehitam-hitaman dan sudah mengandung lilin. Endapan ini dapat digunakan untuk pemanfaatan pembakaran yang cukup dengan temperatur yang tidak terlalu tinggi.

d. Bituminous

Golongan ini dicirikan dengan sifat-sifat yang padat, hitam, rapuh (brittle) dengan membentuk bongkah-bongkah prismatic. Berlapis dan tidak mengeluarkan gas dan air bila dikeringkan. Endapan ini dapat digunakan antara lain untuk kepentingan transportasi dan industri.

e. Anthracite

Golongan ini berwarna hitam, keras, mengkilap, dan pecahannya memperlihatkan pecahan chocoidal. Pada proses pembakaran memperlihatkan warna biru dengan derajat pemanasan yang tinggi. Digunakan untuk berbagai macam industri besar yang memerlukan temperatur tinggi.

2.1.2 Kandungan Batubara

Setiap jenis batubara memiliki komposisi yang berbeda beda. Pengujian kandungan batubara secara proximate dan ultimate dibutuhkan untuk mengetahui karakter dan komposisi dari batubara, secara fisik, kimia dan fuel properties, dari batubara yang akan digunakan pada proses gasifikasi. Pada Gambar 2.1 ditampilkan analisa proximate dari berbagai jenis-jenis

batubara yang menunjukkan kandungan moisture, volatile matter, ash dan fixed carbon pada batubara.

Pada Tabel 2.1 juga ditampilkan analisa ultimate yang bertujuan menyatakan komposisi karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen. Data yang didapatkan dari analisa ultimate dapat digunakan untuk menghitung *Air Fuel Ratio*.

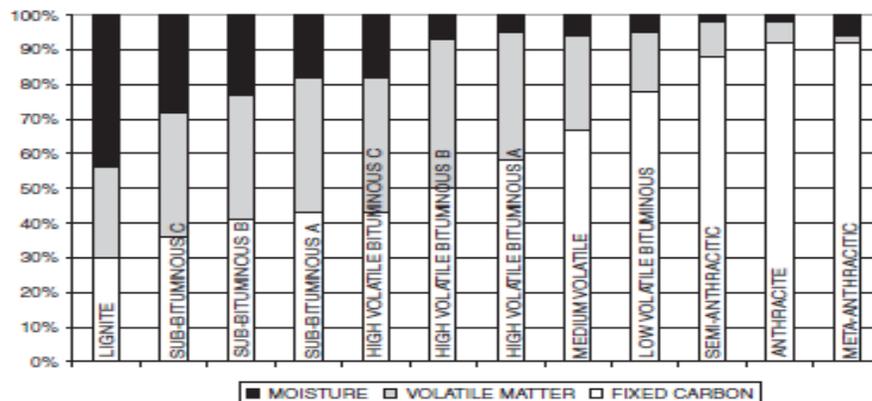
Gambar 2.1 Analisa *ultimate* dari berbagai jenis batubara di dunia

	Low Rank		High Rank	
Rank:	Lignite	Subbituminous	Bituminous	Anthracite
Age:	increases			
% Carbon:	65-72	72-76	76-90	90-95
% Hydrogen:	~5		decreases	
% Nitrogen:	~1-2			
% Oxygen:	~30		decreases	
% Sulfur:	~0		increases	
% Water:	70-30	30-10	10-5	~5
Heating value (BTU/lb):	~7000	~10,000	12,000–15,000	~15,000

(Sumber: Variation of selected coal properties with coal rank)

Adapun rata – rata nilai proximate dan kalor dari batubara di dunia dapat dilihat dari gambar berikut.

Gambar 2.2 Nilai analisa proximate rata-rata di dunia



(Sumber : Boughman, 1987)

2.2 Gasifikasi

2.2.1 Definisi Gasifikasi

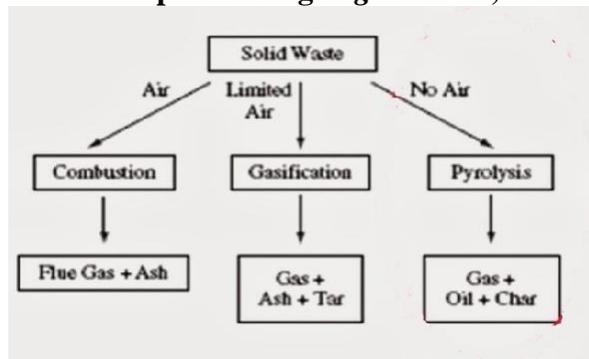
Batubara memiliki tiga metode konversi secara *thermochemical*, yaitu pirolisis, gasifikasi dan pembakaran (combustion). Perbedaan jenis konversi tersebut terletak pada jumlah udara (oksigen) yang dikonsumsi saat proses konversi berlangsung. Teknologi gasifikasi merupakan suatu bentuk peningkatan energi yang terkandung di dalam batubara melalui suatu konversi dari fase padat menjadi fase gas dengan menggunakan proses degradasi termal material-material organik pada temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna. Proses ini berlangsung di dalam suatu reaktor yang disebut *gasifier*. Ke dalam *gasifier* ini nantinya akan dimasukkan bahan bakar batubara untuk dibakar secara tidak sempurna. Dengan kata lain, proses gasifikasi merupakan proses pembakaran parsial bahan baku padat, melibatkan reaksi antara oksigen dengan bahan bakar padat. Uap air dan karbon dioksida hasil pembakaran direduksi menjadi gas yang dapat terbakar (*flammable*), yaitu karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂) dan metan (CH₄). Gas-gas ini dapat dipakai sebagai pengganti BBM guna berbagai keperluan seperti menggerakkan mesin pembakaran dalam (diesel atau bensin), yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik (Trifiananto, M., 2015).

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO, CH₄, dan H₂) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20% - 40% udara stoikiometri). Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material yang mengandung karbon menjadi gas mampu bakar, berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan untuk proses gasifikasi menggunakan material yang

mengandung hidrokarbon seperti batubara dan biomassa. Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam *gasifier*.

Di dalam *gasifier* inilah terjadi suatu proses pemanasan sampai temperatur reaksi tertentu dan selanjutnya bahan bakar tersebut melalui proses pembakaran dengan bereaksi terhadap oksigen untuk kemudian dihasilkan gas mampu bakar dan sisa hasil pembakaran lainnya (Trifiananto, M., 2015).

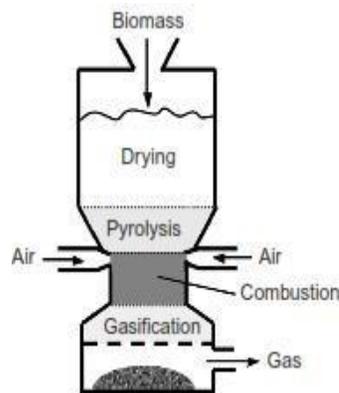
Gambar 2.3 Ilustrasi perbandingan gasifikasi , combustion dan *pyrolysis*



2.2.2 Fix Bed-Gasifier Downdraft

Sebuah *gasifier downdraft* adalah reaktor dimana arah aliran udara dan bahan baku sama-sama menuju bawah. Gas produk mengalir ke bawah (memberikan nama downdraft) dan gas keluar dari bagian bawah *gasifier*. Gasifikasi jenis ini menghasilkan *tar* yang lebih rendah dibandingkan *updraft*. Hal ini karena *tar* yang merupakan hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke daerah pembakaran (*combustion*) dan kemudian gasifikasi yang memiliki temperatur lebih tinggi. Pada daerah gasifikasi dan pembakaran inilah, *tar* kemudian akan terurai.

Gambar 2.4 Skema *downdraft*



2.3 Tahapan Gasifikasi

Pada proses gasifikasi ada beberapa tahapan yang dilalui oleh batubara sehingga pada akhirnya menjadi gas yang *flammable*. Tahapan gasifikasi dapat berbeda untuk setiap *gasifier*. Berdasarkan jurnal proses tersebut meliputi:

a. Drying

Pada proses *drying* dilakukan untuk mengurangi kadar air (*moisture*) yang terkandung didalam batubara bahkan sebisa mungkin kandungan air tersebut hilang. Temperatur pada zona ini berkisar antara 100-250 °C. kadar air pada batubara melalui proses konveksi, karena pada reaktor terjadi pemanasan dari udara bergerak yang memiliki *humidity* yang relatif rendah sehingga dapat mengeluarkan kandungan air pada batubara. Semakin tinggi temperatur pemanasan akan mampu mempercepat proses difusi dari kadar air yang terkandung didalam batubara sehingga proses *drying* akan berlangsung lebih cepat. Reaksi oksidasi, yang terjadi pada reaktor menghasilkan energi panas yang cukup besar dan menyebar ke

seluruh bagian reaktor. Disamping itu kecepatan gerak media pengering turut mempengaruhi proses *drying* yang terjadi.



b. Pirolisis

Pirolisis adalah dekomposisi termokimia dari batubara menjadi produk yang bermanfaat, dalam keadaan tidak adanya oksidator secara total aau dengan pasokan yang terbatas yang tidak mengizinkan gasifikasi ketinggian yang cukup. Ini adalah salah satu beberapa langkah reaksi atau zona yang diamati dalam *gasifier*. Selama pirolisis molekul hidrokarbon kompleks batubara terurai menjadi molekul yang lebih simpel dan relatif lebih kecil seperti gas, cairan, dan *char*. Ini berlangsung pada suhu yang lebih besar dari 250-500 °C.



c. Gasification (Reduction)

Ini adalah zona utama dimana kita mendapatkan *syngas*. Proses reduksi adalah reaksi penyerapan panas (endoterm), yang mana temperatur keluar dari gas yang dihasilkan harus diperhatikan. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia. Diantaranya adalah *Bourdouard reaction*, *steam-carbon reaction*, *water-gas shift reaction*, dan *CO methanation* yang merupakan proses penting terbentuknya senyawa-senyawa yang berguna untuk menghasilkan *flammable gas*, seperti *hydrogen* dan *carbon monoksida*. Proses ini terjadi pada kisaran temperatur 600-1000 °C.

Berikut adalah reaksi kimia yang terjadi pada zona tersebut :

Bourdouard reaction



Steam-carbon reaction



Water-gas shift reaction



Methanation

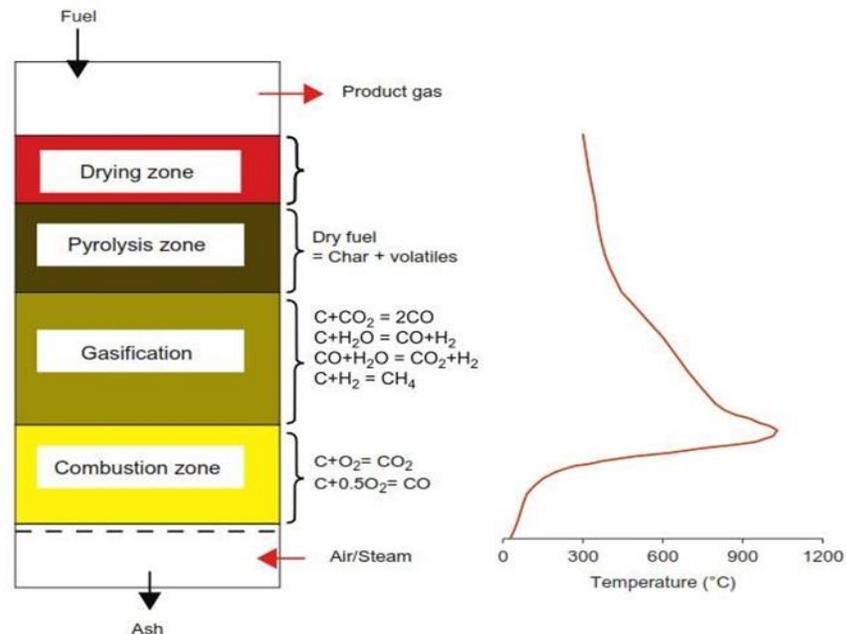


d. Oksidasi Parsial

Proses oksidasi adalah proses yang menghasilkan panas (eksoterm) yang memanaskan lapisan karbon dibawah. Proses yang terjadi pada temperatur yang relatif tinggi, umumnya 700-1500 °C. Pada temperatur setinggi ini pada *gasifierupdraft*, akan memecah substansi *tar* sehingga kandungan *tar* yang dihasilkan lebih rendah. Adapun reaksi kimia yang terjadi pada proses oksidasi ini adalah:



Gambar 2.5 Tahapan dan distribusi suhu pada *gasifier*



2.4 Faktor yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi memiliki beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses dan kandungan syngas yang dihasilkan. Faktor-faktor tersebut adalah:

1. Properties Batubara

Tidak semua batubara dapat dikonversikan menjadi syngas, ada beberapa parameter yang menjadi tolak ukur untuk mengklasifikasikan bahan baku yang baik dan yang kurang baik berdasarkan kandungan dan sifat yang dimilikinya. Beberapa parameter tersebut antara lain :

a. Kandungan Energi

Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki batubara maka syngas hasil gasifikasi batubara tersebut semakin tinggi karena energi yang dapat dikonversi juga semakin tinggi.

b. Moisture

Bahan baku yang digunakan untuk proses gasifikasi umumnya diharapkan bermoisture rendah. Karena 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. Sesungguhnya tar adalah cairan hitam kental yang terbentuk dari destilasi destruktif pada

material organic. Selain itu, tar memiliki bau yang tajam dan dapat mengganggu pernapasan. Pada reactor gasifikasi terbentuknya tar, yang memiliki bentuk *approximate atomic* $\text{CH}_{1.2}\text{O}_{0.5}$, terjadi pada temperature pirolisis yang kemudian terkondensasi dalam bentuk asap, namun pada beberapa kejadian tar dapat berupa zat cair pada temperature yang lebih rendah. Apabila hasil gas yang mengandung tar relative 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 .

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 pereaksi bahan baku

2. Desain Reaktor

Terdapat berbagai macam bentuk gasifier yang pernah dibuat untuk proses gasifikasi. Untuk gasifier bertipe *imbort* yang memiliki *neck* di dalam reaktornya, ukuran dan dimensi *neck* amat mempengaruhi proses pirolisis, pencampuran, *heatloss* dan nantinya akan mempengaruhi kandungan gas yang dihasilkan.

3. Jenis Gasifying Agent

Jenis *Gasifying Agent* yang digunakan dalam gasifikasi umumnya adalah udara dan kombinasi oksigen dan uap. Penggunaan jenis *gasifying agent* mempengaruhi kandungan gas yang dimiliki oleh *syngas*. Berdasarkan penelitian, perbedaan kandungan *syngas* yang mencolok terlihat pada kandungan nitrogen pada *syngas* dan mempengaruhi besar nilai kalor yang dikandungnya. Penggunaan udara bebas menghasilkan senyawa nitrogen

yang pekat di dalam syngas, berlawanan dengan penggunaan oksigen/uap yang memiliki kandungan nitrogen yang relatif sedikit.

Sehingga penggunaan *gasifying agent* oksigen/uap memiliki nilai kalor *syngas* yang lebih baik dibandingkan *gasifying agent* udara.

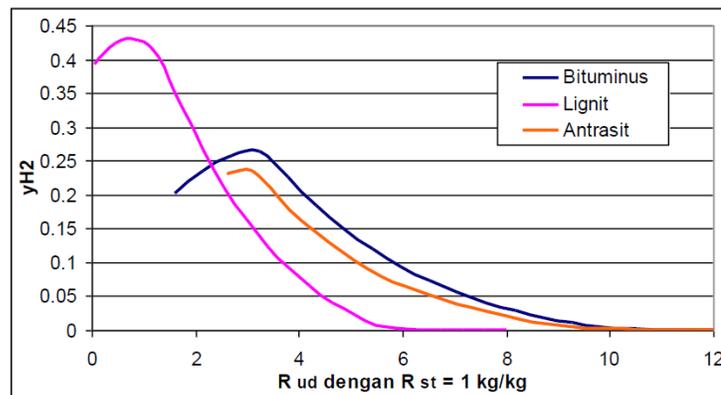
4. Rasio Bahan Bakar dan Udara

Perbandingan bahan bakar dan udara dalam proses gasifikasi mempengaruhi reaksi yang terjadi dan tentu saja pada kandungan syngas yang dihasilkan. Kebutuhan udara pada proses gasifikasi berada di antara batas konversi energi pirolisis dan pembakaran. Karena itu dibutuhkan rasio yang tepat jika menginginkan hasil syngas yang maksimal.

2.5 Pengaruh Jenis Batubara Terhadap Hasil Syngas

Sifat batubara tidaklah seragam. Hal ini disebabkan oleh berbagai factor, antara lain kandungan karbon, Hidrogen, Oksigen, Sulfur, Volatile dan nilai kalor yang dimiliki batubara tersebut. Riza Abrar (2017) menyatakan bahwa gas H_2 yang dihasilkan dari gasifikasi lebih banyak dihasilkan oleh batubara berjenis lignit dibanding dengan jenis batubara subbituminus dan antrasit.

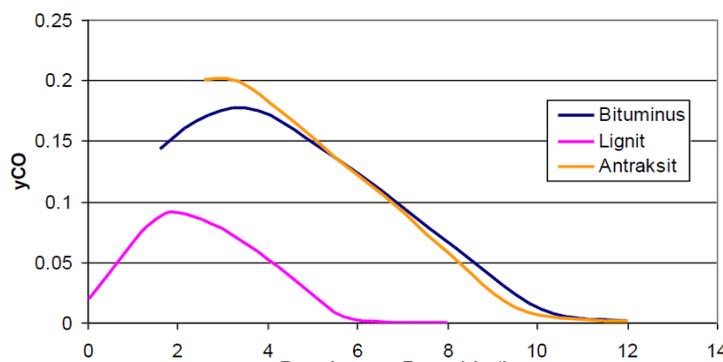
Gambar 2.6 yield H_2 dalam *gas producer* yang dihasilkan



Namun untuk jenis batubara yang menghasilkan senyawa CO, Antrasit memiliki kadar CO maksimum paling tinggi, diikuti oleh bituminus dan lignit, seperti tampak pada Gambar 4 Kondisi ini sesuai dengan banyaknya kadar

karbon dari masing-masing batubara.. Hal ini dinyatakan pada gambar grafik berikut.

Gambar 2.7 fraksi mol CO dalam gas producer.



2.6 Reaktor Gasifikasi

2.6.1 Parameter Penting dalam Proses Gasifikasi

Parameter – parameter penting yang harus dipertimbangkan dalam proses gasifikasi, yaitu :

- a. Temperatur Gasifikasi Temperatur gasifikasi harus tinggi karena dalam tahap pertama gasifikasi adalah pengeringan untuk menguapkan kandungan air dalam sekam padi dan serbuk kayu agar menghasilkan gas yang bersih. Temperatur yang tinggi juga dapat berpengaruh dalam menghasilkan gas yang mudah terbakar. Untuk mempertahankan temperatur, maka tangki 23 reaktor diisolasi dengan bata tahan api agar tidak ada panas yang keluar ke lingkungan sehingga efisiensi reaktor menjadi baik.
- b. Specific Gasification Rate (SGR) SGR mengindikasikan banyaknya biomassa rata-rata yang dapat digasifikasi dalam gasifier. Jika SGR semakin besar maka proses gasifikasi tidak berjalan secara sempurna, sebaliknya jika SGR semakin kecil maka proses gasifikasi berjalan lambat.

- c. Combustion zone rate, mengindikasikan berapa banyak batubara yang dapat terbakar dalam gasifier
- d. Fuel consumption rate adalah batubara yang dibutuhkan pada proses gasifikasi
- e. Jumlah udara dibutuhkan untuk gasifikasi 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 digasifying. Seperti ditunjukkan, ini dapat hanya ditentukan dengan menggunakan tingkat konsumsi bahan bakar (FCR), udara stoikiometri dari bahan bakar, dan rasio ekuevalensi (ϵ) untuk gasifying 0,3 sampai 0,4.
- f. Laju alir udara sebagai pemasok udara dalam reaktor yang mampu menjadi agen gasifikasi dalam pembentukan syngas

2.6.2 Perhitungan Dasar Gasifikasi

Dalam meninjau reaktor terdapat beberapa parameter penting yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan ukuran yang sesuai dengan bahan baku yang akan diuji.

a. Perhitungan design reactor

Dalam merancang bangun alat, perhitungan design reaktor diperuntukan untuk mengetahui proses gasifikasi dengan ukuran yang sesuai secara teori dan dapat membandingkan proses yang terjadi di lapangan. Design reaktor yang perlu diketahui terdiri dari luas, tinggi, diameter, volume, reaktor, *fuel consumption rate*, *specific gasification rate*, jumlah udara yang dibutuhkan dan waktu operasi berlangsung.

b. *Specific Gasification Rate*(SGR)

Ini merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan perunit waktu per luas area dari reaktor. SGR dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$SGR = \frac{\text{weight of coal fuel used (kg)}}{\text{Reactor area (m}^2\text{)} \times \text{operating time (hr)}}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.59)

Dimana :

SGR = *Specific gasification rate*, kg/m²hr

T = *Operating time*, hr

Rc. Area = Luas reaktor ($2 \pi r t$), m²

c. **Fuel Consumption Rate(FRC)**

Jumlah dari batubara dalam pengoperasian di reaktor dibagi dengan waktu operasi. Dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$FCR = \frac{\text{weight of coal fuel used (kg)}}{\text{Operating time (hr)}}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.68)

d. **Tinggi Reaktor**

Hal ini mengacu pada total jarak dari atas hingga bagian bawah reaktor yang perlu diketahui untuk menentukan seberapa lama pengoperasian dalam satu muatan bahan bakar. Pada dasarnya, merupakan fungsi sejumlah variabel seperti waktu yang dibutuhkan untuk mengoperasikan *gasifier* (T), *specific gasification rate* (SGR), dan kepadatan kayu. Ketinggian reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$H = \frac{\text{specific gasification rate (SGR)}}{\rho_{\text{coal}}}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.70)

Dimana :

H = Tinggi reaktor , m

SGR = *Specific gasification rate*, kg/m²hr

T = Waktu, hr

ρ = Densitas batubara, kg/m³

e. **Diameter Reaktor**

Hal ini mengacu pada ukuran reaktor yaitu berupa diameter yang merupakan penampang reaktor dimana bahan bakar batubara akan dibakar. Diameter reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$D = \left(\frac{1,27 \times \text{Fuel Consumption Rate (FRC)}}{\text{Specific Gasification Rate (SGR)}} \right)^{0,5}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.69)

Dimana :

D = Diameter reaktor, m

FRC = *Fuel consumption rate*, kg/hr

SGR = *Specific gasification rate*, kg/m²hr

f. Waktu Yang Diperlukan Untuk Gasifikasi

Hal ini mengacu pada total waktu yang dibutuhkan untuk mengetahui lamanya pengoperasian berlangsung, yaitu berupa lamanya waktu penyalaan bahan bakar, lamanya proses pembakaran semua bahan baku yang ada didalam reaktor dan waktu perubahan bahan bakar menjadi gas. Waktu yang diperlukan untuk pembakaran bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$T = \frac{\rho \times V_r}{\text{Fuel Consumption Rate (FRC)}}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.72)

Dimana :

T = Waktu yang diperlukan untuk pembakaran batubara, hr

V_r = Volume reaktor ($\pi r^2 t$), m³

ρ = Densitas batubara, kg/m³

FRC = *Fuel consumption rate*, kg/hr

g. Jumlah Udara Yang Dibutuhkan Untuk Gasifikasi

Kebutuhan jumlah udara gasifikasi selalu lebih kecil dari pada 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. Laju alir udara dibutuhkan untuk mengubah kayu menjadi gas. Kebutuhan udara dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$AFR = \frac{ER \times \text{Fuel Consumption Rate (FRC)} \times SA}{\rho_{air}}$$

Sumber : (Alexis T. Belonio, 2005, pg.72)

Dimana :

AFR = Laju alir udara, m³/hr

ER = Equivalence ration, 0,3 – 0,4

FRC = Laju pembakaran batubara, kg/hr

SA = Stokiometri udara batubara

ρ = Densitas udara, kg/m³

h. Evaluasi Kinerja Reaktor Gasifikasi

Dalam meninjau kinerja gasifikasi ada beberapa hal yang menjadi parameter. (Knoef et al., 2005) menjelaskan bawah dalam meninjau gasifikasi terdapat dasar dan parameter yang relevan tentang operasi gasifikasi batubara, dan kinerja dan design gasifikasi batubara.

i. Equivalence Ratio (ER)

Pada proses pengoperasian alat gasifikasi, komposisi aliran udara sebagai komponen utama oksidasi harus diberikan dengan tepat. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan proses oksidasi yang baik dan efisien. Model dari schalpfers dan Gumz sering menggunakan komposisi gas sebagai fungsi dari temperature dan *equivalence ratio* (ER), dimana jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran.

$$ER = \frac{\text{fuel} - \text{to} - \text{oxider} - \text{ratio}}{(\text{fuel} - \text{to} - \text{oxider} - \text{ratio})_{\text{stoichiometric}}}$$

Nilai ekivalen rasio didefinisikan sebagai berikut :

Sumber : (Turns, 2002 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.14)

$$ER, \phi = \frac{\text{Air to fuel ratio}}{(\text{Air to fuel ratio})_{\text{stoichiometric}}} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)}{\left(\frac{A}{F}\right)_s}$$

Equivalence ratio dari proses gasifikasi merupakan salah satu parameter paling penting untuk penyesuaian kondisi operasi (Ramirez et al., 2007). Udara bahan bakar stokiometri untuk pembakana gasifikasi dapat diperoleh dari :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = 8,89 (\%C + 0,375 \times \%S) + 26,5 \times \%H - 3,3 \times \%O$$

Sumber : (Knoef et al, 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

Dimana:

- %C Karbon dari batubara
- %H Hidrogen dari batubara
- %O Oksigen dari batubara
- %S Sulfur dari batubara

j. *Superficial Velocity*

Kecepatan superficial adalah salah satu parameter yang paling penting menentukan kinerja reaktor gasifier, mengendalikan laju produksi gas, kandungan energi gas, tingkat konsumsi bahan bakar, daya output, dan tingkat tar/produksi arang. Kecepatan superficial didefinisikan sebagai laju aliran gas (m^3/s) dibagi dengan luas penampang silinder keramik dalam (m^2) (Knoef et al., 2005).

Kecepatan yang sebenarnya jauh lebih tinggi karena adanya bahan batubara. Sebuah kecepatan superficial rendah yang menyebabkan kondisi pirolisis relative lambat dan hasil arang tinggi dan gas dengan kandungan tar yang tinggi.

$$\text{Superficial velocity} = \frac{\text{gas flow rate}}{\text{cross - sectional area}}$$

Sumber : (Knoef et al, 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

k. Gas Heating Value

Kandungan energy mengacu pada nilai kalor dan itu mempengaruhi output energy gasifier. Ada dua cara untuk menghitung nilai panas gas :

- *Lower Heating Value* (LHV)
- *Higher Heating Value* (HHV)

Dalam penelitian ini LHV digunakan dalam analisis dan dihitung dari :

$$\text{LHV} = 10,768[\text{H}_2] + 12,696[\text{CO}] + 35,866[\text{CH}_4] + 83.800[\text{C}_n\text{H}_m]$$

Sumber : (Michael Lubwama, 2011, pg.15)

Dalam hal ini untuk mendapatkan LHV didasarkan pada kondisi normal untuk masing-masing gas produser. Persen volumetrik dari hydrogen, karbon monoksida, metana dan setiap hidrokarbon lain yang diketahui dari hasil kromatografi gas.

1. Laju Alir dan Produksi Gas

Laju aliran gas (m^3/s) dapat dihitung dari aliran udara awal jika kandungan nitrogen dalam gas diketahui. Laju alir gas dapat diukur dengan *orifice*, *venturi*, tabung pitot atau rotameter ditempatkan dialiran gas (Knoef et al, 2005).

$$\text{Gas production rate} = \frac{\text{air flow rate} \times \left(\frac{3,76}{4,76}\right)}{\text{Nitrogen mole fraction of dry producer gas}}$$

Sumber : (Knoef et al, 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

Daya keluaran dari proses gasifikasi diperoleh sebagai berikut :

$$\text{Power output} = \text{gas flow rate} \times \text{LHV}_{\text{gas}}$$

Sumber : (Knoef et al, 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)