

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Biomassa**

Biomassa merupakan sebuah bahan organik *biodegradable* yang berasal dari tumbuhan, hewan dan mikroorganisme. Dapat juga berupa produk samping, residu dan limbah dari pertanian, hutan dan industri-industri yang berkaitan dengan non-fosil dan fraksi organik *biodegradable* dari industri dan berkaitan dengan limbah. Biomassa dihasilkan melalui proses fotosintesis dengan menyerap CO<sub>2</sub>. Pada proses pembakaran biomassa akan dihasilkan karbon dioksida yang akan diserap oleh tanaman dari atmosfer sehingga pembakaran biomassa tidak akan menambah kandungan karbon dioksida di bumi. Karena alasan inilah biomassa dianggap bahan bakar yang bersifat *zero emission*. (Basu, 2010).

Energi yang terkandung dalam biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil seperti minyak bumi. Hal ini dikarenakan beberapa sifatnya yang menguntungkan yaitu, dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*). Biomassa juga relatif tidak mengandung unsur sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara. Dengan memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi alternatif juga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian.

##### **2.1.1 Pelet Kayu**

Pelet kayu adalah serpihan kayu atau sisa-sisa hasil produksi kayu yang berdiameter 6-8 mm dan berukuran panjang 10-30 mm, dan sudah kering. Serpihan kayu ini kemudian mengalami proses lanjut tanpa campuran kimia, ditekan dengan tekanan kuat menggunakan mesin khusus. Pelet kayu menghasilkan panas kurang lebih 4,9 kWh/kg karena memiliki kadar air yang rendah (8-10%), kadar abu (0,5-1%) dengan kerapatan 650 kg/m<sup>3</sup>. Satu kilogram pelet kayu menghasilkan panas yang sama dengan yang dihasilkan oleh setengah liter minyak (Leaver, 2008). Pelet kayu yang berbentuk silinder dapat digunakan

sebagai bahan bakar kebutuhan rumah tangga, pertanian, dan industri besar. Pelet kayu merupakan salah satu sumber energi alternatif dan ketersediaan bahan bakunya sangat mudah ditemukan. Bahan baku pelet kayu berupa limbah eksploitasi seperti sisa penebangan, cabang dan ranting, limbah industri perkayuan seperti sisa potongan, serbuk gergaji dan kulit kayu, limbah pertanian seperti jerami dan sekam (Woodpellets, 2000).



Gambar 2.1 Pelet Kayu

### 2.1.2 Produk Hasil Gasifikasi Biomassa

Produk yang dihasilkan dari biomassa cukup banyak manfaatnya. Namun, pemanfaatan utama dari biomassa yaitu untuk dikonversi menjadi bahan bakar. *Syngas* dikenal sebagai sumber penting untuk memproduksi bahan kimia, seperti diesel atau bensin melalui sintesis *Fischer-Tropsch* (FT), hidrogen (diproduksi di kilang), pupuk (melalui amonia), dan methanol. *Gas Producer* dari *gasifier* mengandung *syngas* ( $H_2$ , CO), gas mampu bakar ( $CH_4$ ), gas tak mampu bakar ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) dengan kemungkinan *gas inert* yang ada dalam agen gasifikasi seperti  $N_2$  dalam udara, dan berbagai kontaminan.

Di dalam konversi biomassa secara biokimiawi, molekul-molekul biomassa di pecah menjadi molekul-molekul yang lebih kecil oleh bakteri atau enzim. Proses ini lebih lambat dibandingkan konversi termokimia, tetapi tidak dibutuhkan energi eksternal yang cukup banyak (Basu, 2010).

### 2.1.3 Kandungan Energi Dalam Biomassa

Kandungan energi dalam biomassa biasa dinyatakan dalam besaran *Higher Heating Value* (HHV) atau *Lower Heating Value* (LHV). HHV menunjukkan panas pembakaran biomassa jika gas hasil pembakaran dikembalikan pada suhu sebelum pembakaran (biasanya ditetapkan 25°C). HHV sering dinyatakan dengan *gross calorific value* (GCV). LHV dikenal juga dengan *nett calorific value* (NCV) didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan dengan pembakaran penuh dalam jumlah tertentu dikurangi panas penguapan air dalam produk pembakaran. Hubungan antara HHV dan LHV sebagai berikut:

$$\text{HHV [Btu/lb]} = 145,44 \text{ C} + 620,28 \text{ H} + 40,5 \text{ S} - 77,54 \text{ O} \quad (2.1)$$

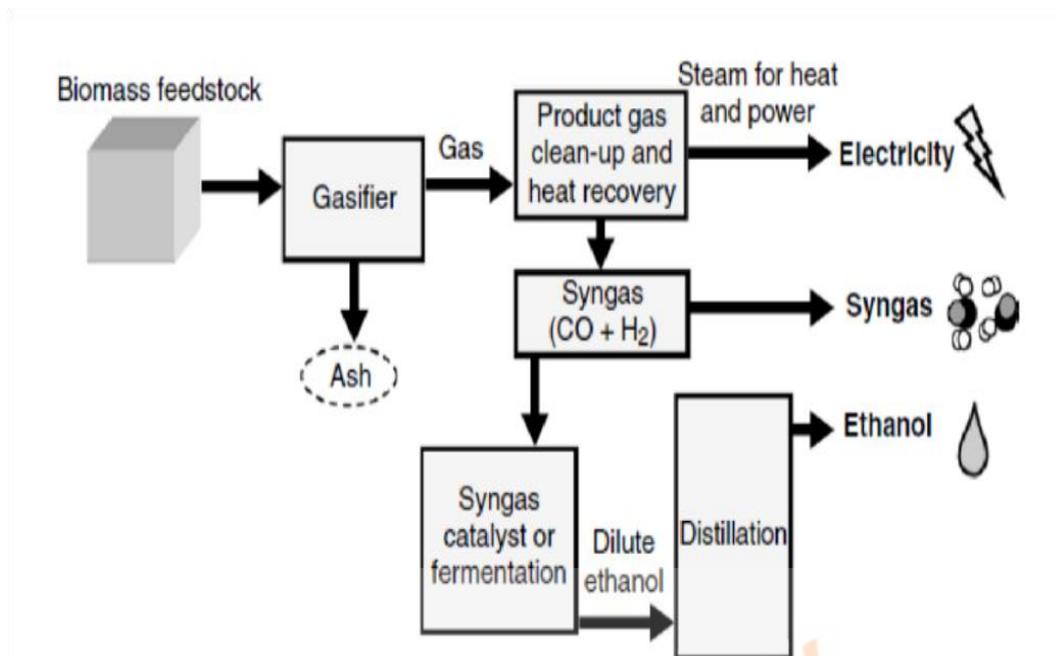
$$\text{LHV} = \text{HHV} - \text{H}_g \cdot \left( \frac{9\text{H}}{100} + \frac{\text{M C}}{100} \right) \quad (2.2)$$

Di mana LHV, HHV, H, dan M adalah nilai pemanasan yang lebih rendah, nilai pemanasan yang lebih tinggi, persentase hidrogen, dan persentase *moisture* sedangkan  $\text{H}_g$  adalah panas laten uap air dalam unit yang sama dengan HHV (mis., 970 BTU / lb, 2260 kJ / kg, atau 540 kCal / kg). (Basu, 2010).

## 2.2 Gasifikasi

Biomassa memiliki tiga metode konversi energi, yaitu pirolisis, gasifikasi dan pembakaran. Perbedaan jenis konversi energi tersebut terletak pada banyaknya oksigen yang dikonsumsi saat proses konversi berlangsung. Proses pembakaran membutuhkan oksigen lebih banyak daripada proses gasifikasi sementara pada proses pirolisis, oksigen yang digunakan sangat sedikit. Jumlah oksigen yang dibutuhkan ini dinyatakan dengan parameter perbandingan udara terhadap bahan bakar atau *Air-Fuel Ratio* (AFR). (Reed and Das, 1998).

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  dan  $\text{H}_2$ ) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20% - 40% udara stoikiometri).



**Gambar 2.2** Konversi Secara Termokimia untuk Memproduksi Energi, Gas dan Etanol dari Biomassa (Basu, 2010)

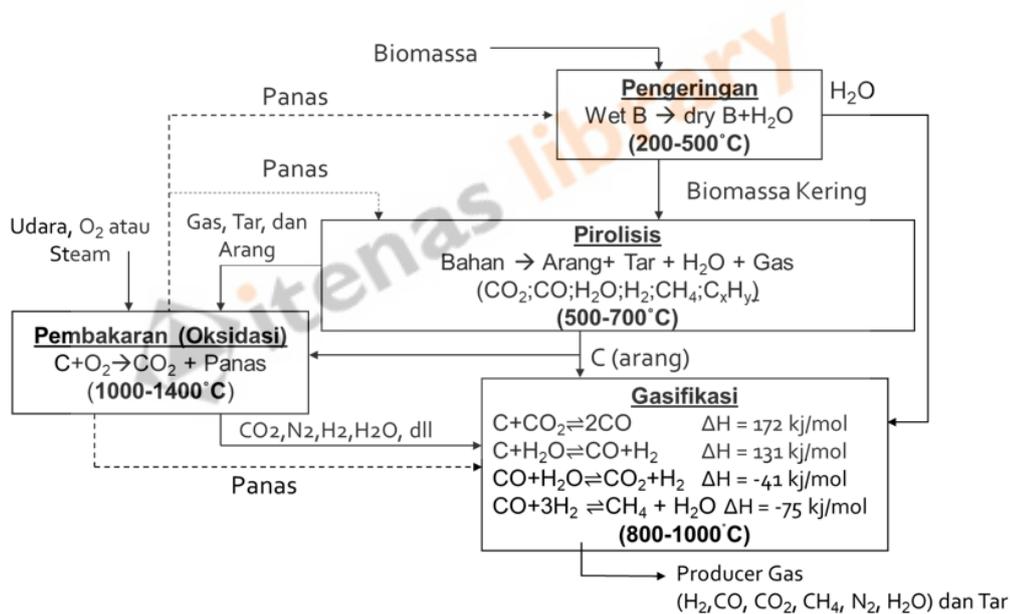
Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material yang mengandung karbon menjadi gas mampu bakar. Berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan untuk proses gasifikasi menggunakan material yang mengandung hidrokarbon seperti batubara, petcoke (*petroleum coke*), dan biomassa.

Pada Gambar 2.2 dijelaskan tahapan memproduksi energi, gas, dan etanol dari suatu biomassa. Bahan baku untuk proses gasifikasi dapat berupa limbah biomassa, yaitu potongan kayu, tempurung kelapa, sekam padi maupun limbah pertanian lainnya. Gas hasil gasifikasi ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan sebagai sumber bahan bakar, seperti untuk menjalankan mesin pembakaran, digunakan untuk memasak sebagai bahan bakar kompor, ataupun digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik sederhana. Melalui gasifikasi, semua bahan organik kering dapat dikonversi menjadi bahan bakar, sehingga memiliki potensi sebagai substituen bahan bakar fosil sebagai sumber bahan bakar.

## 2.3 Tahapan Pada Proses Gasifikasi

Gasifikasi secara sederhana dapat dijelaskan sebagai proses pembakaran bertahap. Hal ini dilakukan dengan membakar biomassa padat dengan adanya oksigen yang terbatas sehingga gas yang terbentuk dari hasil pembakaran masih memiliki potensi untuk terbakar. Gasifikasi memiliki tujuan untuk memutuskan ikatan dari molekul kompleks tersebut menjadi gas sederhana mampu bakar yaitu  $H_2$  dan  $CO$ .

Pada Gambar 2.3 menjelaskan tahapan dari suatu proses gasifikasi. Proses gasifikasi terdapat empat tahapan yaitu pengeringan, pirolisis, pembakaran (oksidasi) dan gasifikasi (reduksi) dengan rentang temperatur masing-masing yaitu pengeringan ( $200-500^\circ C$ ), pirolisis ( $500-700^\circ C$ ), pembakaran ( $1000-1400^\circ C$ ) dan gasifikasi ( $800-1000^\circ C$ ).



Gambar 2.3 Tahapan Proses Gasifikasi (Molino, 2016)

### 2.3.1 Tahap Pengeringan

Reaksi ini terletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam *gasifier*. Proses pengeringan ini sangat penting dilakukan agar pengapian dapat terjadi lebih cepat dan lebih stabil. Pada reaksi ini, air yang terkandung dalam bahan bakar akan dihilangkan dengan cara diuapkan.

### 2.3.2 Tahap Pirolisis

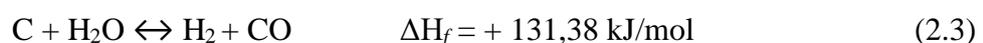
Dalam zona pirolisis tidak ada agen eksternal yang ditambahkan saat temperatur mencapai 500–700°C, biomassa mulai mengalami proses pirolisis yaitu perengkahan molekul besar menjadi molekul-molekul kecil akibat pengaruh temperatur tinggi. Proses ini berlangsung temperatur 500-700°C. Hasil proses pirolisis ini adalah arang, uap air, tar, dan gas. Pirolisis, proses yang mengawali gasifikasi melibatkan panas perengkahan dari molekul hidrokarbon besar menjadi molekul gas yang kecil tanpa reaksi kimia dengan menggunakan udara, gas dan medium gasifikasi lainnya.

### 2.3.3 Tahap Gasifikasi (Reduksi)

Zona reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang energinya didukung oleh energi panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reaksi reduksi terjadi antara temperatur 800-1000°C. Pada reaksi ini, arang yang dihasilkan melalui reaksi pirolisis tidak sepenuhnya karbon tetapi juga mengandung hidrokarbon. Untuk itu, agar dihasilkan gas mampu bakar seperti CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> maka arang tersebut harus direaksikan dengan H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Kemudian gas CO dan gas H<sub>2</sub> dapat dimanfaatkan untuk membentuk bahan bakar seperti bensin dan solar dengan teknologi tertentu, sehingga campuran kedua gas tersebut sering disebut gas sintetik atau lebih dikenal sebagai syngas. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia, diantaranya adalah *Bourdouard reaction*, *CO shift reaction*, *water-gas shift reaction* dan *methanation*.

#### 1. Water-Gas Shift Reaction

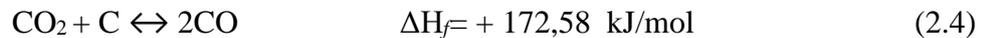
*Water-gas shift reaction* merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh kukus yang dapat berasal dari bahan bakar padat itu sendiri (hasil pirolisis) maupun dari sumber yang berbeda, seperti uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air. Reaksi yang terjadi pada *water-gas reaction* adalah:



Pada beberapa gasifier, kukus dipasok sebagai agen gasifikasi dengan atau tanpa udara/oksigen.

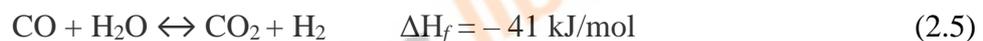
## 2. *Boudouard Reaction*

*Boudouard reaction* merupakan reaksi antara karbondioksida yang terdapat di dalam gasifier dengan arang untuk menghasilkan CO. Reaksi yang terjadi pada *boudouard reaction* adalah:



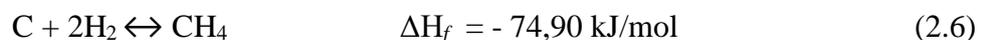
## 3. *CO Shift conversion*

*CO Shift conversion* merupakan reaksi reduksi karbonmonoksida oleh kukus untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini dikenal menghasilkan peningkatan perbandingan hidrogen terhadap karbonmonoksida pada gas produser. Reaksi ini digunakan pada pembuatan gas sintetik. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



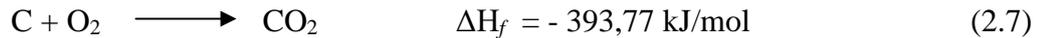
## 4. *Methanation*

*Methanation* atau metanasi merupakan reaksi pembentukan gas metan. Reaksi yang terjadi pada metanasi adalah:

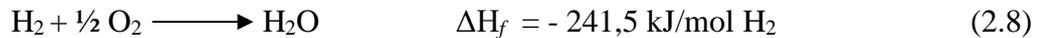


### 2.3.4 Tahap Pembakaran

Oksidasi atau pembakaran arang merupakan reaksi yang menyuplai panas untuk proses yang ada di dalam gasifier. Proses ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Oksigen yang dipasok ke dalam *gasifier* bereaksi dengan substansi yang mudah terbakar. Hasil reaksi tersebut adalah  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  yang secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada pirolisis. Reaksi yang terjadi pada proses pembakaran adalah:



Reaksi pembakaran lain yang berlangsung adalah oksidasi hidrogen yang terkandung dalam bahan bakar membentuk kukus. Reaksi yang terjadi adalah:



Ada tiga elemen penting untuk melakukan reaksi pembakaran ini, yaitu panas (*heat*), bahan bakar (*fuel*), dan udara (*air*). Reaksi pembakaran hanya akan terjadi jika ketiga elemen tersebut tersedia. Di dalam udara tidak hanya terkandung oksigen ( $\text{O}_2$ ) saja, tapi juga terdapat nitrogen ( $\text{N}_2$ ) dengan berbandingan 21%-mol dan 79%-mol. Nitrogen ini jika terikat dengan  $\text{O}_2$  akan menjadi polutan yaitu  $\text{N}_2$  yang bisa menjadi racun dan mencemari udara. Disamping menjadi polutan,  $\text{N}_2$  juga dapat menyerap panas pada proses pembakaran sehingga bisa menurunkan efisiensi pembakaran. Dalam perhitungan neraca massa dan energi jumlah nitrogen yang masuk sama dengan yang keluar dan sedikit membentuk  $\text{NO}_2$  atau dengan kata lain gas ini hanya lewat dalam proses dan mengurangi efisiensi pembakaran.

#### 2.4 Hasil Gasifikasi

Gasifikasi dapat menghasilkan *Gas Producer* juga tar. *Gas Producer* terutama terdiri dari gas- gas mampu bakar yaitu  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  dan  $\text{CH}_4$  dan gas-gas tidak mampu bakar  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{N}_2$ . Komposisi gas ini sangat tergantung pada komposisi dalam biomassa, bentuk dan partikel biomassa, serta kondisi-kondisi proses gasifikasi. (Susanto, 2014). Selain itu terdapat juga produk – produk samping yang terbentuk dari gasifikasi berupa senyawa yang biasa disebut tar. Tar merupakan produk samping yang tidak diinginkan dalam proses gasifikasi karena dapat merusak alat akibat penyumbatan yang dapat mengganggu jalannya proses gasifikasi. Namun terbentuknya tar merupakan hal yang tidak dapat dihindari karena merupakan produk samping dari proses gasifikasi.

### 2.4.1 *Producer Gas*

Hasil utama yang diinginkan dari proses gasifikasi adalah *syngas* yang terdiri dari gas CO dan H<sub>2</sub>. Secara keseluruhan, hasil gasifikasi adalah berupa gas yang biasa disebut *Gas Producer* yang mengandung *syngas* dan CH<sub>4</sub> sebagai senyawa mampu bakar, serta CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> sebagai gas tak mampu bakar.

Komposisi dari *gas producer* sangat dipengaruhi oleh kondisi dari gasifikasi yang dilakukan, mulai dari jenis reaktor yang digunakan, *gasifying agent* yang digunakan serta jenis biomassa yang digunakan. Selain itu pengumpanan biomassa ke dalam reaktor juga dapat mempengaruhi *gas producer* yang dihasilkan.

**Tabel 2.1** Komposisi Gas Hasil Pada Berbagai Gasifikasi Biomassa (Sumber: Wahyudin, 2012)

Jenis Biomassa	Metode	Persen Volume (%)					Nilai kalor (MJ/m <sup>3</sup> )
		CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Arang	<i>Downdraft</i>	28-31	5-10	1-2	1-2	55-60	4,6-5,65
Tongkol	<i>Downdraft</i>	19-24	10-15	-	11-	-	7,20
Tongkol	<i>Downdraft</i>	16.1	9.6	0.95	-	-	3,25
Bonggol	<i>Downdraft</i>	18.6	16.5	6.4	-	-	6,29
Arang	<i>Updraft</i>	30	19.7	-	3,6	46	5,98
Kayu	<i>Downdraft</i>	17-22	16-20	2-3	10-	55-60	5-5,86

Dari Tabel 2.1 tersaji data komposisi dari *gas producer* beberapa gasifikasi biomassa. Data tersebut diambil dari penelitian dengan beberapa variabel yang berbeda di mana terdapat perbedaan dari hasil komposisi *gas producer*. Tabel 2.1 dapat menunjukkan perkiraan komposisi *gas producer* dengan digunakan jenis biomassa yang berbeda dengan variabel percobaan yang berbeda.

### 2.4.2 *Syngas*

Produk utama yang diinginkan dari proses gasifikasi adalah *syngas*. *Syngas* merupakan campuran dari senyawa hidrogen (H<sub>2</sub>) dan karbon monoksida (CO). *Syngas* dapat dihasilkan dari berbagai macam hidrokarbon seperti gas alam,

minyak bumi, batu bara serta biomassa. *Syngas* yang diproduksi dari biomassa biasa disebut *biosyngas*. *Syngas* merupakan produk yang sangat dibutuhkan pada beberapa industri, seperti industri metanol serta industri pupuk yang berbahan dasar ammonia. Pada industri metanol *syngas* yang digunakan memiliki syarat, salah satunya adalah kandungan hidrogen kurang lebih adalah 71% dan kandungan karbon monoksida adalah 19%.

Terdapat dua cara untuk memproduksi *syngas* dengan metode gasifikasi, yaitu gasifikasi dengan suhu rendah ( $T < 1000^{\circ}\text{C}$ ) serta gasifikasi dengan suhu tinggi ( $T > 1200^{\circ}\text{C}$ ). Gasifikasi dengan suhu rendah biasanya memproduksi sejumlah hidrokarbon rantai panjang sebagai produk samping selain dari karbon monoksida dan hidrogen. Hidrokarbon rantai panjang yang dihasilkan kemudian diproses agar dapat digunakan untuk berbagai proses lainnya. Pada gasifikasi dengan suhu tinggi, sebagian besar biomassa akan terkonversi menjadi hidrogen dan karbon monoksida, di mana pada umumnya akan dilanjutkan dengan *shift reaction* untuk menyesuaikan rasio antara  $\text{H}_2$  dan  $\text{CO}$  agar sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan (Basu, 2010).

#### 2.4.3 Tar

Tar merupakan faktor pengganggu yang paling besar dalam gasifikasi berupa cairan dengan viskositas tinggi, pekat, berwarna hitam yang terkondensasi pada temperatur rendah pada alat gasifikasi, tar dapat menyebabkan penyumbatan pada saluran gas dan menyebabkan gangguan sistem. Tar sangat tidak diharapkan pada proses gasifikasi, meskipun begitu pembentukan tar tidak dapat dihindari, karena tar merupakan produk samping dari proses gasifikasi ini.

### 2.5 Faktor Yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi memiliki beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses dan kandungan *syngas* yang dihasilkannya. Faktor-faktor tersebut berkaitan dengan karakteristik biomassa, desain gasifier, jenis *gasifying agent* dan *air-fuel ratio* (AFR). (Hidayat, 2013).

a. Karakteristik Biomassa, meliputi:

1. Kandungan energi, semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa maka potensi energi yang dapat dikonversi juga semakin besar.
2. Kadar air (*moisture content*), kandungan air yang tinggi menyebabkan *heat loss* yang berlebihan dan beban pendinginan gas semakin tinggi.
3. Tar, merupakan salah satu kandungan yang paling merugikan dan harus dihindari karena sifatnya yang korosif, berbau tajam dan menurunkan kualitas gas sebagai bahan bakar motor.
4. Ukuran bahan, semakin besar ukuran bahan maka akan semakin besar pula kecepatan minimum fluidisasinya.
5. *Ash* merupakan kandungan mineral yang terdapat pada bahan baku yang tetap berupa oksida setelah proses pembakaran. Sedangkan *slag* adalah kumpulan *ash* yang lebih tebal. Adanya *ash* dan *slag* pada gasifier menyebabkan penyumbatan pada gasifier.

b. Desain Gasifier

Bentuk gasifier yang dibuat untuk proses gasifikasi sangat mempengaruhi proses secara keseluruhan. Misalnya, pada reaktor gasifikasi *downdraft* terdapat desain dengan *neck* atau penyempitan di bagian tengah *gasifier* yang juga dikenal dengan nama *imbort gasifier*. (Reed and Das, 1998).

c. Gasifying Agent

Penggunaan jenis *gasifying agent* mempengaruhi kandungan gas yang dimiliki oleh *syngas*. Misalnya, 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.

d. Air-Fuel Ratio (AFR)

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.

### 2.5.1 Gasifying Agent

*Gasifying Agent* (Agen Penggasifikasi) atau bisa juga disebut medium gasifikasi, adalah reaktan yang akan kontak dan bereaksi dengan bahan baku padat berkarbon membentuk senyawa gas sintesis seperti CO dan H<sub>2</sub>. Medium gasifikasi bermacam-macam bentuknya, seperti udara, kukus, oksigen murni ataupun karbondioksida, pemilihan dari medium yang digunakan didasari dari *gas producer* yang ingin diperoleh (Basu, 2010). Penggunaan udara sebagai medium akan menggeser diagram kearah oksigen, di mana produk akhir banyak mengandung karbon dioksida dan karbon monoksida. Penggunaan oksigen murni akan menghasilkan gas dengan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan udara sebagai medium, karena keberadaan nitrogen yang bersifat inert. Sementara untuk menghasilkan *gas producer* dengan konsentrasi hidrogen yang tinggi, maka penggunaan kukus sebagai medium menjadi preferensi. Penggunaan medium kukus dan udara juga dapat menjadi pilihan untuk menghasilkan gas dengan kualitas baik dengan efisiensi termal yang tinggi.

### 2.5.2 Air to Fuel Ratio

Air to Fuel Ratio (AFR) adalah rasio laju udara yang diumpankan dengan laju bahan bakar atau biomassa yang diumpankan.

$$\text{AFR} = \frac{\text{Laju udara yang diumpankan}}{\text{Laju biomassa yang diumpankan}} \quad (2.6)$$

AFR merupakan parameter operasi yang penting karena gasifikasi membutuhkan panas yang diperoleh dari reaksi pembakaran antara biomassa dengan udara, namun nilai AFR yang terlalu tinggi akan menyebabkan kualitas gas produser menurun. Nilai AFR optimum secara langsung akan dipengaruhi oleh parameter-parameter operasi lain seperti temperatur. Karena itu, nilai AFR optimum akan bersifat spesifik terhadap proses yang dilakukan.

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{th,m,d}} = \frac{2,66C+7,94H_2+0,998S+ O_2}{0,232} \quad (2.7)$$

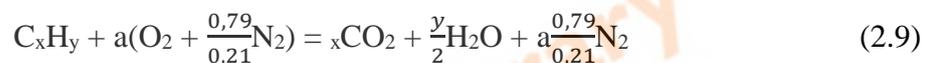
(Culp, 1996)

### 2.5.3 Equivalence Ratio

Besarnya AFR dapat diketahui dari uji coba reaksi pembakaran yang benar-benar terjadi, nilai ini disebut AFR aktual. Sedangkan AFR lainnya adalah AFR stoikiometri, merupakan AFR yang diperoleh dari persamaan reaksi pembakaran. Dari perbandingan nilai AFR tersebut dapat diketahui nilai *Equivalent Ratio (ER)* :

$$ER = \frac{AFR_{\text{aktual}}}{AFR_{\text{stoikiometri}}} \quad (2.8)$$

Untuk dapat mengetahui nilai AFR, maka harus dihitung jumlah keseimbangan atom C, H dan O dalam suatu reaksi pembakaran. Adapun rumus umum reaksi pembakaran yang menggunakan udara kering adalah:



## 2.6 Reaktor Gasifikasi

Teknologi gasifikasi terus berkembang sesuai dengan sifat fisik maupun sistem yang berlangsung dalam proses gasifikasi tersebut. Dalam hal ini reaktor gasifikasi atau gasifier dapat dibedakan berdasar mode fluidisasi, arah aliran dan *gasifyig agent* yang diperlukan.

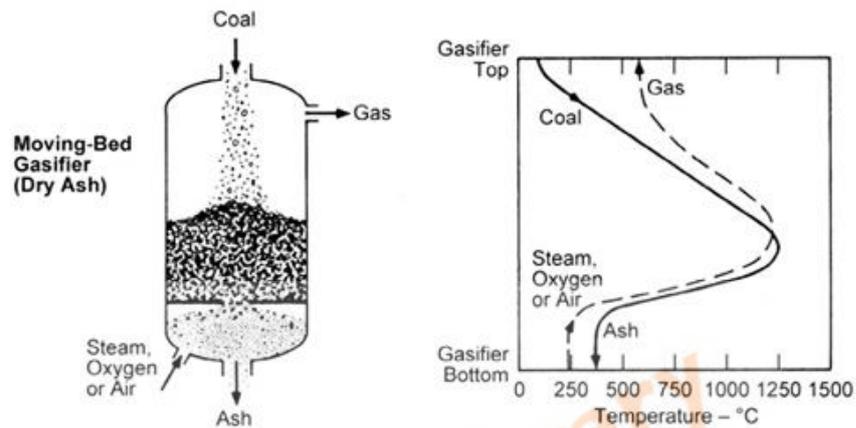
### 2.6.1 Reaktor Gasifikasi Berdasarkan Mode Fluidisasi

Berdasarkan mode fluidisasinya, gasifier dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu: mode gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*), mode gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*) dan mode gasifikasi *entrained flow*. Sampai saat ini yang digunakan untuk skala proses gasifikasi skala kecil adalah mode gasifier unggun tetap. (Reed and Das, 1988).

#### 1. Gasifikasi Unggun Tetap (*Fixed Bed Gasification*)

Sistem gasifikasi unggun tetap terdiri dari reaktor/gasifier yang dilengkapi dengan sistem pendingin dan pembersihan udara. Gasifier unggun tetap memiliki unggun dari partikel bahan bakar padat yang melewati media gasifikasi dan gas ke atas maupun ke bawah. Ini merupakan tipe gasifier paling sederhana yang biasanya terdiri dari

sebuah silinder dengan ruang kosong untuk bahan bakar dan media gasifikasi dengan dilengkapi unit pengumpan bahan bakar, sebuah unit penghilangan abu dan sebuah saluran keluar gas. Gasifier ini terbuat dari batu bata, baja atau beton.

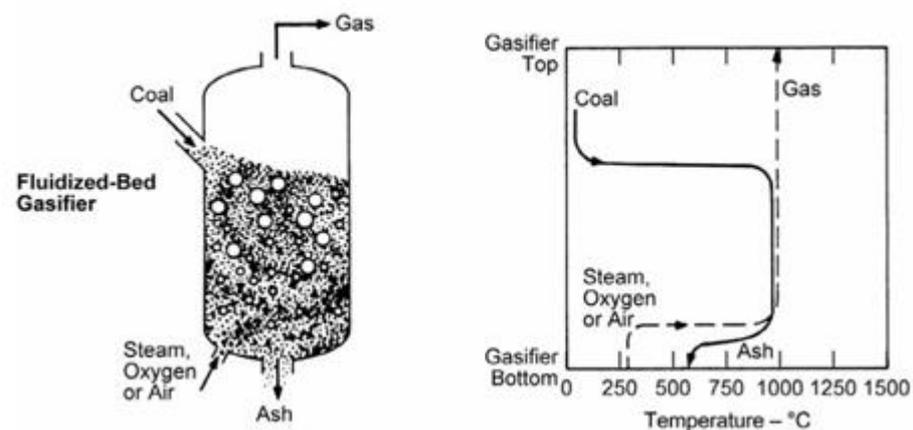


Gambar 2.4 Skema Fixed-Bed Gasification (Chopra, 2007)

Pada fixed bed gasifier unggun bahan bakar bergerak perlahan ke reaktor ketika proses gasifikasi terjadi (Gambar 2.4). Fixed bed gasifier memiliki konstruksi yang sederhana dan secara umum beroperasi dengan konversi karbon yang tinggi, waktu tinggal padatan yang lama, laju gas yang rendah dan abu yang terbawa rendah. (Carlos, 2005; Reed and Das, 1988).

## 2. Gasifikasi Unggun Terfluidisasi (*Fluidized Bed Gasification*)

Gasifikasi unggun terfluidisasi menggunakan prinsip pencampuran kembali dan mencampur partikel pada umpan dengan partikel umpan yang sudah mengalami gasifikasi. Suhu operasi biasanya kurang dari suhu fusi abu untuk menghindari pembentukan klinker dan kemungkinan de-fluidisasi dari unggun. (Basu, 2006).



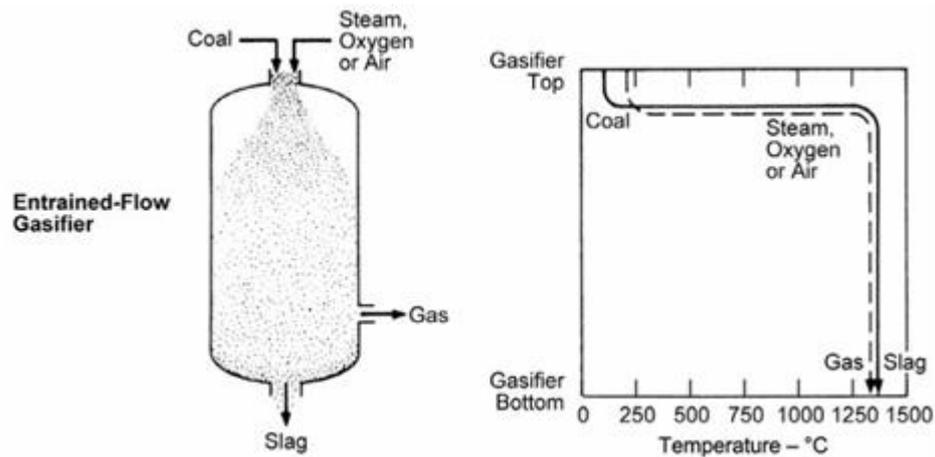
**Gambar 2.5** Skema *Fluidized-bed Gasification* (Arena, 2009)

Pada Fluidized-bed Gasification (Gambar 2.5) umpan masuk di sisi reaktor, sementara uap dan oksidan masuk didekat bagian bawah dengan kecepatan yang cukup untuk memenuhi fluidized gas gasifier. Karena pencampuran dalam gasifier menyeluruh maka. Gasifier ini biasanya beroperasi pada suhu yang cukup tinggi untuk mencapai tingkat konversi yang diinginkan.

### 3. *Entrained-Flow Gasification*

Pada *Entrained-flow gasification* umpan halus dan oksidan dan/atau uap diumpankan searah ke dalam gasifier. Hal ini menghasilkan oksidan dan uap disekitar partikel umpan saat mereka mengalir melalui gasifier dalam awan yang tebal. Gasifier ini memiliki kemampuan untuk menangani hampir semua bahan baku dan menghasilkan syngas yang bersih dengan bebas tar. (Arena, 2009).

Entrained-flow gasifier beroperasi pada temperatur dan tekanan yang tinggi, dan aliran yang sangat turbulen yang menyebabkan konversi umpan yang cepat dan memungkinkan seluruhnya terkonversi (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Skema Entrained-Flow Gasification (Arena, 2009)

### 2.6.2 Reaktor Gasifikasi Berdasarkan Arah Aliran

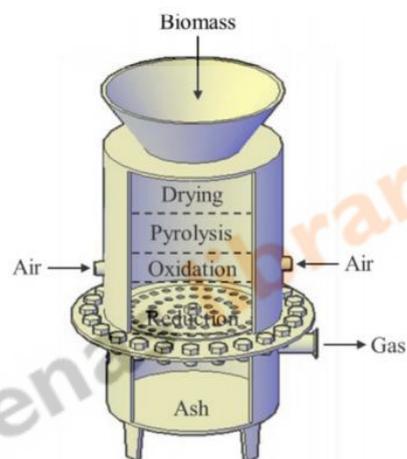
Berdasarkan arah aliran, fixed bed gasifier dapat dibedakan menjadi: reaktor aliran berlawanan (*updraft gasifier*), reaktor aliran searah (*downdraft gasifier*) dan reaktor aliran menyilang (*crossdraft gasifier*). Pada *updraft gasifier*, arah aliran padatan ke bawah sedangkan arah aliran gas ke atas. Pada *downdraft gasifier*, arah aliran gas dan arah aliran padatan adalah sama-sama ke bawah. Sedangkan pada *crossdraft gasifier*, arah aliran gas dijaga mengalir mendatar dengan aliran padatan ke bawah (Hadi, dkk.,2013).

### 2.6.3 Reaktor Gasifikasi Berdasarkan *Gasifying Agent*

Berdasarkan *gasifying agent* yang diperlukan, terdapat gasifikasi udara dan gasifikasi oksigen/uap. Gasifikasi udara adalah metode di mana gas yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah udara. Sedangkan pada gasifikasi uap, gas yang digunakan pada proses yang terjadi adalah uap.

## 2.7 *Downdraft Gasifier*

Pada *downdraft gasifier* urutan proses yang berlangsung yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi. *Downdraft gasifier* memanfaatkan sistem oksidasi tertutup untuk memperoleh temperatur tinggi. Selama proses pengeringan, uap air dalam biomassa didorong oleh panas dari proses oksidasi. Selain untuk pengeringan, panas yang dikeluarkan selama proses oksidasi digunakan untuk proses pirolisis dan reduksi, gas volatile dilepaskan selama proses pirolisis dan gas produser terbentuk selama proses reduksi dan keluar dari gasifier melalui outlet gas.



**Gambar 2.7** Skema Downdraft Gasifier (Susastriawan, 2017)

Pada sistem *downdraft gasifier*, bahan bakar dimasukkan dari atas gasifier kemudian udara dimasukkan melalui bagian tengah gasifier menuju zona pembakaran dan syngas keluar melalui bagian bawah reaktor atau biasa disebut dengan co-current reactor (Gambar 2.7).

## 2.8 Penelitian Yang Telah Dilakukan Terkait Gasifikasi Kayu Sengon

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan Linda Dwi Cahyaningsih dan Afif Arky Nugroho mahasiswa Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Nasional Bandung pada tahun 2018 dengan reaktor gasifikasi tipe *updraft*. Dalam penelitian ini dikaji pengaruh dari variasi ER terhadap peroleh producer gas hasil gasifikasi serut kayu sengon. Pelaksanaan penelitian dilakukan di Institut Teknologi Nasional Bandung dengan menggunakan gasifier tipe *updraft*, dimulai dengan melakukan

pengujian terhadap properti kayu albasia dengan analisis proksimat dan ultimat, kemudian dilanjutkan dengan proses gasifikasi serut kayu sengon dengan variasi ER adalah 15%, 20%, 25%, 30% dan 130%. Proses gasifikasi dilakukan setelah gas hasil gasifikasi *steady* dengan udara sebagai medium gasifikasi. Pada saat percobaan data yang diambil adalah suhu tiap zona dalam gasifier dan sampel dari gas hasil gasifikasi pada saat keadaan *steady*. Sampel gas hasil gasifikasi dianalisis menggunakan metode Gas Chromatography di Laboratorium Metodika Perancangan dan Pengendalian Proses, Institut Teknologi Bandung (ITB). Hasil yang didapatkan dari proses gasifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.5 sebagai berikut:

**Tabel 2.2** Data Hasil Penelitian Gasifikasi Updraft Serut Kayu Sengon (Cahyaningsih dan Nugroho, 2018)

ER (%)	Komposisi Producer Gas			
	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>
15	0,42	2,54	13,02	84,01
20	1,24	2,23	10,43	86,09
25	0,86	1,67	10,11	87,35
30	0,52	0,80	0,09	98,59
130	0,00	0,83	0,58	98,60