

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses yang menggunakan panas untuk merubah biomassa padat atau padatan berkarbon lainnya 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, netral. Gas yang dihasilkan pada gasifikasi disebut gas produser yang kandungannya didominasi oleh gas CO, H₂, dan CH₄.

Bahan bakar yang umum digunakan pada gasifikasi adalah bahan bakar padat, salah satunya adalah batubara. Jika ditinjau dari produk yang dihasilkan, pengolahan batubara dengan gasifikasi lebih menguntungkan dibandingkan pengolahan dengan pembakaran langsung. Dengan teknik gasifikasi, produk pengolahan batubara lebih bersifat fleksibel karena dapat diarahkan menjadi bahan bakar gas atau bahan baku industri yang tentunya memiliki nilai jual yang lebih tinggi. Untuk melangsungkan gasifikasi diperlukan suatu reaktor. Reaktor tersebut berfungsi sebagai tungku tempat berlangsungnya proses gasifikasi dimana terjadi kontak antara bahan bakar dengan medium penggasifikasi di dalam *gasifier*.

2.2 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Gasifikasi

1. 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.

2. Tekanan *Bed*

Tekanan *Bed* telah dilaporkan memiliki efek yang signifikan pada proses gasifikasi. Nandi dan Onischak (1985) menemukan penurunan berat badan selama devolatilization residu tanaman di N₂ suasana di 815°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 H₂O / N₂ pada suhu 815° 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.

3. Tinggi *Bed*

Pada suhu reaktor tertentu, waktu tinggal yang lebih lama (karena ketinggian *bed* yang lebih tinggi) meningkat berjumlah hasil gas. Sadaka et al. (1998) menunjukkan bahwa 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.

4. 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*

5. Rasio Kesetaraan

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

6. Kadar air dari bahan

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

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 memuncak. Tomeczek *et al.* (1987) menggunakan campuran udara-uap dalam 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.

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.

2.3 Perhitungan Dasar Gasifikasi

Selama proses gasifikasi terjadi dua transformasi utama yaitu perpindahan massa dan perpindahan kalor (energi panas). Perpindahan massa ditentukan oleh kesetimbangan massa zat yang masuk dengan massa yang keluar dari sistem tersebut. Sedangkan perpindahan kalor ditentukan oleh kesetimbangan energi yang masuk dengan energi yang keluar. Kesetimbangan massa adalah jumlah semua unsur yang terkandung dalam suatu unit massa input (bahan bakar dan udara) sama dengan jumlah unsur-unsur yang dihasilkan pada output berupa syngas dan abu selama proses gasifikasi terjadi. Sedangkan kesetimbangan energi adalah kondisi dimana besar energi kalor yang dihasilkan dalam suatu unit massa bahan bakar dengan nilai kalor spesifik tertentu dikurangi dengan kerugian kalor yang terjadi selama proses gasifikasi.

2.3.1 Perhitungan Keseimbangan Massa (*Mass Balance*)

Perhitungan keseimbangan massa dan energi secara umum tergantung dengan masing-masing jenis sistem reaktor gasifikasi. Perhitungan ini juga meliputi perhitungan aliran *syngas* (*flow rate*), laju konsumsi bahan bakar (*mass fuel rate*), dan laju aliran udara gas gasifikasi.

$$\begin{aligned}\sum Mass Input &= \sum Mass Output \\ m(bio) + m(Udara) &= m(syngas) + m(char) + m(Ash)\end{aligned}$$

a. Laju konsumsi bahan bakar

$$\dot{M}_{Bb} = \frac{m_{Bb} (Kg)}{t (s)}$$

Dimana :

\dot{M}_{Bb} = Laju konsumsi bahan bakar (Kg/s)

m_{Bb} = massa bahan bakar (Kg)

t = waktu (s)

Menurut Guswendar (2012), laju pemakaian bahan bakar dipengaruhi oleh ketiga faktor yaitu kapasitas bahan bakar dalam reaktor, sisa pembakaran dan durasi operasional. Peneliti ini membandingkan laju bahan bakar pada double outlet gasifier dan konvensional gasifier.

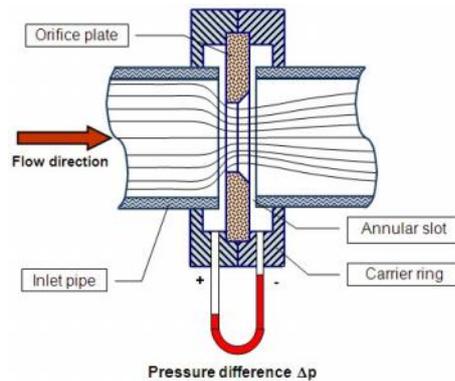
b. Laju Aliran Udara

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).

$$ER = \frac{\text{Laju alir udara gasifikasi} \times \text{Durasi Operasional}}{\text{Jumlah massa bahan bakar} \times \left(\frac{A}{f}\right) \text{ untuk } \phi = 1}$$

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. Blower pada sistem gasifikasi updraft berperan untuk memberikan pasokan udara tersebut ke ruang bakar.



Gambar 1. Laju Alir Udara

Untuk mendapatkan komposisi udara oksidasi yang pas, maka pipa pasokan udara blower harus terpasang orifis dan manometer yang tersambung dengan katub untuk mengatur besar kecilnya hembusan udara. Orifis adalah salah satu alat pengukur tekanan fluida pada suatu sistem pemipaan. Alat ini mempunyai sekat pada sambungannya yang telah diberikan lubang dengan diameter tertentu (biasanya setengah dari diameter pipa). Pada bagian depan dan belakang sekat orifis terdapat lubang manometer yang berfungsi sebagai tabung pengukur perbedaan fluida yang masuk dan keluar dari sekat orifis. Aliran udara sebelum masuk sekat orifis akan lebih besar daripada udara setelah keluar dari orifis. Perbedaan tersebut akan menghasilkan perbedaan tinggi fluida yang terjadi pada tabung manometer. Perhitungan laju alir udara dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = C_d \cdot A \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot \Delta P}{\rho_0}} \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1985:})$$

Dimana :

$$C_d = 0,61 \text{ (discharge coefficient)}$$

$$A = \pi \cdot d^2 / 4 \text{ (Luas permukaan pelat orifice)}$$

K = konstanta manometer pipa U

P = perbedaan tekanan akibat orifice (kg/m²)

ρ_0 = massa jenis udara (kg/m³)

- Massa laju alir udara dapat dihitung :

$$\dot{m}_{udara\ primer} = Q_{udara\ primer} \cdot \rho_0$$

c. Massa Jenis Syngas

Massa jenis gas campuran (Kg/m³), pers :

$$\rho_{mix} = \frac{\rho_1 x_1 + \rho_2 x_2 + \dots + \rho_n x_n}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1985:})$$

Dimana :

ρ_1, \dots, ρ_n = massa jenis dari tiap komponen (Kg/m³)

x_1, \dots, x_n = fraksi mol dari tiap komponen gas

d. Massa laju alir syngas dapat dihitung :

$$\dot{m}_{syngas} = Q_{syngas} \cdot \rho_{mix} \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1985:})$$

2.3.2 Efisiensi Gasifikasi

Efisiensi gasifikasi adalah persentase energi dari bahan bakar yang diubah menjadi gas mampu bakar (masih mengandung tar). Efisiensi gasifikasi juga dapat diartikan sebagai rasio energi yang dihasilkan oleh pembakaran sejumlah *gas producer* dengan energi yang dihasilkan oleh pembakaran biomassa secara konvensional. Persamaan berikut ini digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi (Mathieu, Phillippe. 2002).

$$\eta = \frac{\text{flowrate syngas (m}^3/\text{s)} \times \text{LHV syngas (kcal/m}^3\text{)}}{\text{mass flowrate bahan bakar (kg/s)} \times \text{LHV bahan bakar (kcal/kg)}}$$

Dimana :

Flowrate syngas = laju alir *syngas* (m³/s)

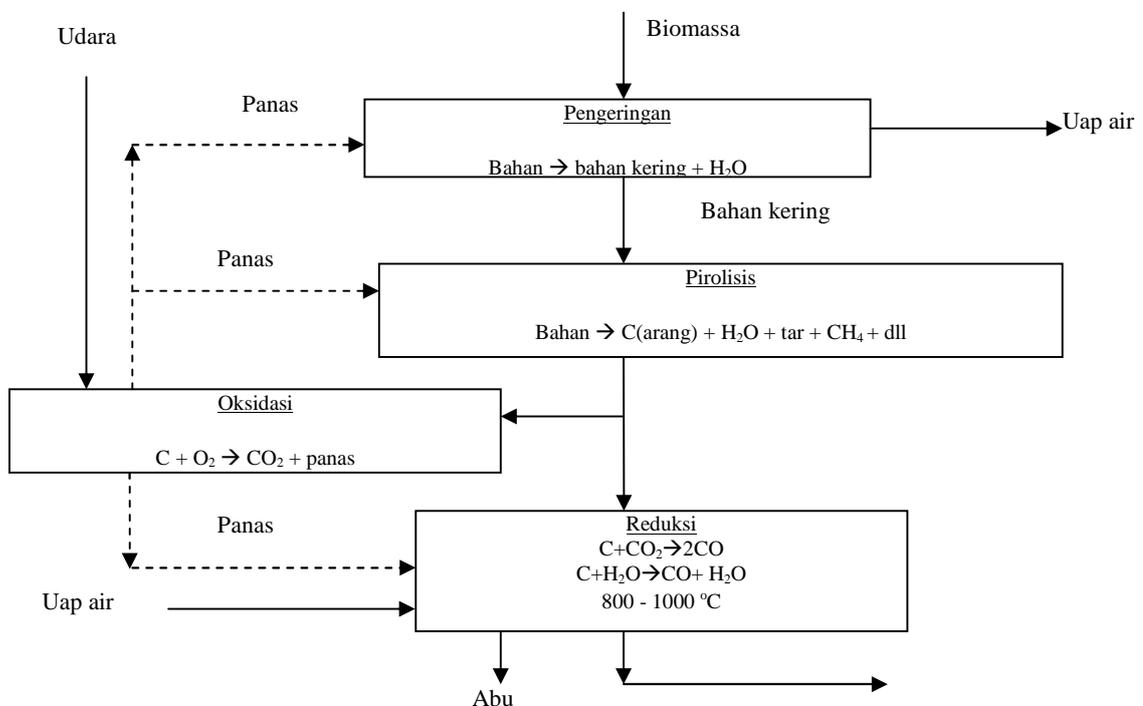
LHV syngas = *Lower Heating Value* (LHV) *syngas* (kcal/m³)

Mass flowrate bahan bakar = Laju alir massa bahan bakar (kg/s)

LHV bahan bakar = *Lower Heating Value* (LHV) bahan bakar (kkal/kg)

2.4 Proses –Proses Pada Reaktor Gasifikasi

Gasifikasi secara sederhana dapat dijelaskan sebagai proses pembakaran bertahap. Hal ini dilakukan dengan membakar bahan bakar padat dengan ketersediaan oksigen yang terbatas sehingga gas yang terbentuk dari hasil pembakaran masih memiliki potensi untuk terbakar. Bahan bakar gasifikasi dapat berupa material padatan berkarbon biasanya biomassa (kayu atau limbah berselulosa) atau batubara. Semua senyawa organik mengandung atom karbon (C), hydrogen (H) dan oksigen (O), dalam wujud molekul kompleks yang bervariasi. Gasifikasi terdiri dari empat tahapan terpisah yang terdiri dari proses Pengeringan: $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, Pirolisis/Devolatilisasi: $150 < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, Oksidasi/pembakaran: $700 < T < 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, Reduksi: $800 < T < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$



Gambar 1. Proses –Proses Pada Reaktor Gasifikasi

2.4.1 Pengerinan

Pada pengerinan, kandungan air pada bahan bakar padat diuapkan oleh panas yang diserap dari proses oksidasi. Reaksi ini erletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperature paling rendah di dalam reaktor yaitu di bawah 150° C. Proses pengerinan ini sangat penting dilakukan agar pengapian pada burner dapat terjadi lebih cepa dan lebih stabil.

2.4.2 Pirolisis

Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Pada pirolisis, pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari arang atau padatan karbon bahan bakar juga menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada T 700 °C. Komposisi produk yang tersusun merupakan fungsi temperatur, tekanan, dan komposisi gas selama pirolisis berlangsung.

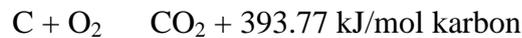
Produk cair yang menguap mengandung tar dan PAH (*polyaromatic hydrocarbon*). Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H₂, CO, CO₂, H₂O, dan CH₄), tar, dan arang.

2.4.3 Oksidasi (Pembakaran)

Untuk melakukan reaksi oksidasi (pembakaran) terdapat tiga elemen penting yang saling mengisi satu sama lain yaitu panas, bahan bakar, dan udara. Reaksi pembakaran sangat berkaitan dengan keberadaan ketiga elemen tersebut karena apabila salah satu dari ketiga elemen tersebut tidak ada maka hamper dapat dipastikan tidak akan terjadi proses pembakaran.

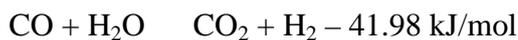
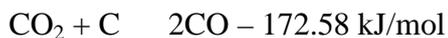
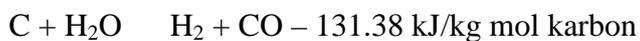
Oksidasi atau pembakaran arang merupakan reaksi terpenting yang terjadi di dalam gasifier. Proses ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Oksigen yang dipasok ke dalam gasifier bereaksi dengan substansi yang mudah terbakar. Hasil reaksi tersebut adalah CO₂ dan H₂O yang

secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada pirolisis. Reaksi yang terjadi pada proses pembakaran adalah:



2.4.4 Reduksi (Gasifikasi)

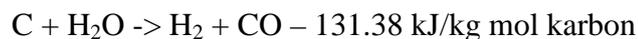
Reduksi atau gasifikasi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Produk yang dihasilkan pada proses ini adalah gas bakar, seperti H_2 , CO , dan CH_4 . Reaksi berikut ini merupakan empat reaksi yang umum terlibat pada gasifikasi.



Berikut merupakan tahapan-tahapan reduksi :

1. *Water-gas reaction*

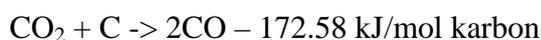
Water-gas reaction merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh kukus yang dapat berasal dari bahan bakar padat itu sendiri (hasil pirolisis) maupun dari sumber yang berbeda, seperti uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air. Reaksi yang terjadi pada *water-gas reaction*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



Pada beberapa gasifier, kukus dipasok sebagai medium penggasifikasi dengan atau tanpa udara/oksigen.

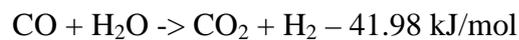
2. *Boudouard reaction*

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



3. *Shift conversion*

Shift conversion merupakan reaksi reduksi karbonmonoksida oleh kukus untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini dikenal sebagai *water-gas shift* yang 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 merupakan reaksi pembentukan gas metan. Reaksi yang terjadi pada *methanation* adalah:



2.5 Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan bagian dari buah kelapa yang fungsinya secara biologis adalah pelindung inti buah dan terletak di bagian sebelah dalam sabut dengan ketebalan berkisar antara 2-6 mm. Pemanfaatan buah kelapa selama ini baru sebatas daging buahnya untuk dijadikan santan, kopra dan minyak. Untuk tempurung kelapa hanya sebatas dibakar untuk menghasilkan arang aktif sehingga perlu dilakukan pemanfaatan agar tidak mencemari lingkungan serta diharapkan dapat menjadi sumber energi alternatif bagi masyarakat maupun industri.

Tempurung kelapa dikategorikan sebagai kayu keras dengan kadar air sekitar 6-9 % (dihitung berdasarkan berat kering). Data komposisi kimia tempurung kelapa dapat kita lihat pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia tempurung kelapa

Komponen	Persentase (%)
Selulosa	26,6
Hemiselulosa	27,7
Lignin	29,4
Abu	0,6
Komponen Ekstraktif	4,2
Uronat Anhidrat	3,5
Nitrogen	0,1
Air	8,0

Sumber: Suhardiyono, 1988

Produksi kelapa khususnya di Sumatera Selatan cukup berpotensi. Data 5 tahun terakhir produksi kelapa dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Produksi Kelapa Menurut Provinsi Sumatera Selatan, 2008 - 2013

Tahun	2009	2010	2011	2012	2013
Produksi	59.035	54.001	66.037	59.366	60.070
Pertumbuhan (%)	1,19				

Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan, 2013

Berdasarkan data terjadi peningkatan produksi buah kelapa di Sumatera Selatan sebesar 1,19 % pada tahun 2013. Dengan melihat pertumbuhan tersebut maka tempurung kelapa cukup berpotensi untuk dijadikan bahan bakar proses gasifikasi. Dari 1,1 juta ton/tahun tempurung dengan kemungkinan energi yang dapat dihasilkan 18,7 x 10⁶ GJ/tahun (Ihsan, *et al*, 2012). Selain itu, kandungan karbon yang terkandung dalam tempurung kelapa cukup tinggi seperti ditunjukkan hasil analisa *ultimate* pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Ultimate*, *Proximate*, dan *Lower Heat Value* (LHV) Tempurung Kelapa

Komponen	Analisa Ultimate (%w)	Analisa Proximate (%w)	Nilai Kalor Tempurung Kelapa (KJ/kg)
Carbon (C)	47,89		
Hydrogen (H)	6,09		
Oxygen (O)	45,75		
Nitrogen (N)	0,22		
Sulphur (S)	0,05		
Volatile Matter		68,82	
Moisture		6,51	
Ash		7,56	
Fixed Carbon		17,11	
Low Heating Value			20890

Sumber : Najib, *et al*, 2014

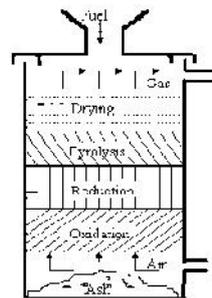
2.6 Jenis Reaktor

Teknologi gasifikasi yang terus berkembang mengarahkan klasifikasi teknologi sesuai dengan sifat fisik maupun system yang berlangsung dalam menciptakan proses gasifikasi. Berdasarkan mode fluidisasinya, gasifier dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: mode gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*),

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

a. *Updraft gasifier*

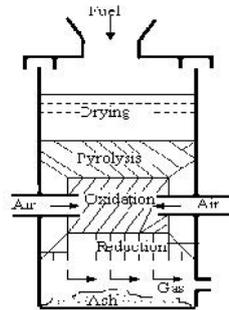
Pada *updraft gasifier*, udara masuk melalui bagian bawah gasifier melalui grate dan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas. Proses ini terjadi secara berallawanan arah (*counter current*). Gas produser yang dihasilkan keluar dari bagian atas sedangkan abu diambil di bagian bawah. Reaksi pembakaran (oksidasi) pada jenis ini terjadi di dekat grate dan diikuti reaksi reduksi (proses gasifikasi) kemudian gas produser menembus unggun bahan bakar menuju ke daerah yang memiliki temperatur lebih rendah. Sistem *Updraft Gasifier* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Updraft Gasifier*

b. *Downdraft gasifier*

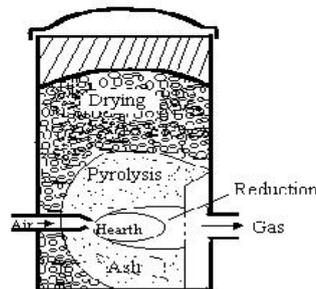
Pada *downdraft gasifier* udara dimasukkan ke dalam aliran bahan bakar padat (*packed bed*) pada atau di atas zona oksidasi. Aliran udara ini searah (*co-current*) dengan aliran bahan bakar yang masuk ke dalam gasifier. Udara dimasukkan dari bagian atas. Gas hasil pembakaran dilewatkan pada bagian oksidasi dari pembakaran dengan cara ditarik mengalir ke bawah sehingga gas yang dihasilkan akan lebih bersih karena tar dan minyak akan terbakar sewaktu melewati bagian tadi. Sistem *Downdraft Gasifier* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. *Downdraft Gasifier*

c. Crossdraft gasifier

Pada *Crossdraft gasifier*, udara disemprotkan ke dalam ruang bakar dari lubang arah samping yang saling berhadapan dengan lubang pengambilan gas sehingga pembakaran dapat terkonsentrasi pada satu bagian saja dan berlangsung secara lebih banyak dalam suatu satuan waktu tertentu. Sistem *Crossdraft Gasifier* dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. *Crossdraft Gasifier*

Kelebihan dan kekurangan *updraft gasifier* dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Kelebihan dan Kekurangan *Updraft Gasifier*

Type Gasifier	Kelebihan	Kekurangan
<i>Updraft</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mekanismenya sederhana - Hilang tekan rendah - Efisiensi panas baik - Kecenderungan membentuk terak sedikit - Arang (charcoal) habis terbakar 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensitif terhadap tar dan uap bahan bakar - Memerlukan waktu start up yang cukup lama untuk mesin <i>internal combustion</i>.