

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gasifikasi**

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) (Guswendar, 2012). 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. 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, kita dapat mengkonversi hampir semua bahan organik kering menjadi bahan bakar, sehingga dapat menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber bahan bakar.

Ada empat tahapan dalam proses gasifikasi yaitu pengeringan, pirolisis, reduksi dan oksidasi dengan rentang temperatur masing-masing proses, yaitu:

- Pengeringan:  $T < 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- Pirolisis/Devolatilisasi:  $150 < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$
- Reduksi:  $800 < T < 1000 \text{ }^\circ\text{C}$
- Oksidasi:  $700 < T < 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

##### **2.1.1 Proses Pengeringan**

Reaksi ini terletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam reaktor yaitu di bawah  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Proses pengeringan ini sangat penting 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. Menurut Kurniawan (2012), penelitian yang telah dilakukannya menunjukkan bahwa pengeringan manual oleh sinar matahari berperan penting dalam mempercepat proses pengeringan didalam reaktor oleh panas reaksi pembakaran (oksidasi). Penjemuran dengan sinar matahari pada suhu diatas 32 °C selama dua jam dapat mempercepat waktu pengeringan di dalam reaktor hingga 30% atau kurang dari 25 menit. Jika dibandingkan dengan penjemuran pada suhu 30 °C yang mencapai 25-40 menit untuk proses pengeringan saja.

### 2.1.2 Pirolisis

Pirolisis atau *devolatilisasi* disebut juga sebagai gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada  $T < 350$  °C dan terjadi secara cepat pada  $T > 700$  °C. 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, pada laju pemanasan 10°C/dtk, pirolisis selesai dalam 1 menit, atau pirolisis selesai dalam 5 detik pada 100°C/dtk. 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.

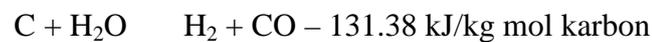
### 2.1.3 Reduksi

Reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reaksi reduksi terjadi antara temperatur 500°C sampai 1000°C. Pada reaksi ini, arang yang dihasilkan melalui reaksi pirolisis tidak sepenuhnya karbon tetapi juga mengandung hidrokarbon yang terdiri dari hidrogen dan oksigen. Untuk itu, agar dihasilkan gas mampu

bakar seperti CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> maka arang tersebut harus direaksikan dengan air dan karbon dioksida. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia, diantaranya adalah Bourdour reaction, steam-carbon reaction, water-gas shift reaction, dan CO methanation.

### 1. Water-gas reaction

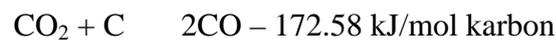
Water-gas reaction merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh kukus yang dapat berasal dari bahan bakar padat itu sendiri (hasil pirolisis) maupun dari sumber yang berbeda, seperti uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air. Reaksi yang terjadi pada water-gas reaction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



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

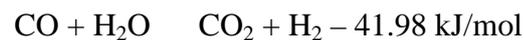
### 2. Boudouard reaction

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



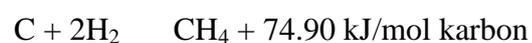
### 3. Shift conversion

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:



### 2.1.4 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 CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>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:



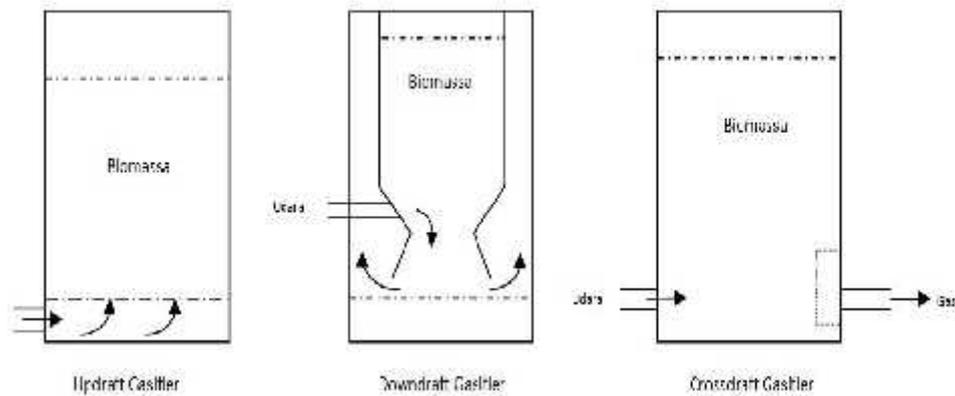
Ada tiga elemen penting untuk melakukan reaksi pembakaran ini, yaitu panas (*heat*), bahan bakar (*fuel*), dan udara (*oxygen*). Reaksi pembakaran hanya akan terjadi jika ketiga elemen tersebut tersedia. Di dalam udara tidak hanya terkandung oksigen (O<sub>2</sub>) saja, tapi juga terdapat nitrogen (N<sub>2</sub>) dengan berbanding 21% dan 79%. Nitrogen ini jika terikat dengan O<sub>2</sub> akan menjadi polutan yaitu NO<sub>2</sub> yang bisa menjadi racun dan mencemari udara. Disamping menjadi polutan, N<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub> atau dengan kata lain gas ini hanya lewat dalam proses dan mengurangi efisiensi pembakaran.

## 2.2 Reaktor 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: 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 gasifikasi *crossdraft* arah aliran gas dijaga mengalir mendatar dengan aliran padatan ke bawah (Hantoko, dkk.,2011).



**Gambar 1.** Tipe *Gasifier* Berdasarkan Arah Aliran

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. Penelitian ini dilakukan menggunakan *updraft gasifier* dan *gasifying agent* udara karena kemampuan dan kelebihanannya, meskipun masih memiliki beberapa kekurangan. Kelebihan dan kekurangan *updraft gasifier* dapat dilihat pada tabel 1.

**Tabel 1.** Kelebihan dan Kekurangan *Updraft Gasifier*

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

*Sumber: Rinovianto, 2012*

### 2.3 Pembersihan Gas Sintetik

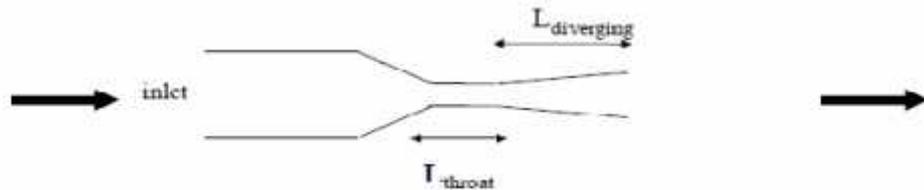
Gas hasil pembakaran dalam *gasifier* biasanya masih bercampur dengan berbagai unsur yang tidak diperlukan dan gas keluaran masih memiliki temperatur tinggi. Unsur yang tidak diperlukan itu antara lain partikel padat (partikel yang tidak terkonversi), pengotor anorganik (halida, alkali, senyawa belerang dan nitrogen) dan kotoran organik (tar, aromatik dan karbon dioksida). Gas hasil pembakaran/gas mampu bakar ini akan direaksikan dengan udara untuk dibakar menjadi energi. Pembakaran gas ini merupakan reaksi sintesis sehingga gas yang dihasilkan harus lebih murni. Oleh karena itu gas keluar didinginkan dan dibersihkan terlebih dahulu.

Cara untuk membersihkan gas dari debu atau partikel yang tidak diinginkan yaitu tar, dengan filtrasi (*scrubber*). Sistem filtrasi dibagi menjadi dua, yaitu *wet scrubber* dan *dry scrubber*. Prinsip dasar dari semua jenis filtrasi sama yaitu membersihkan gas dari unsur-unsur seperti senyawa sulphur, nitrogen, debu yang terangkut oleh gas, kelembaban dari gas, temperatur gas serta produk distilasi yaitu tar, minyak serta gas-gas yang tidak terkondensasi dan uap air.

#### 2.3.1 Venturi Scrubber

*Venturi scrubber* masuk ke dalam jenis *wet scrubber*. Pada pengolahan ini, liquid yang digunakan adalah air. *Venturi scrubber* menggunakan prinsip differensial antara gas yang memiliki kecepatan yang tinggi dan aliran beban dari air untuk membuat droplet-droplet yang akan menangkap pengotor dan membuat pengotor terkumpul seperti kumpulan lumpur yang akan dialirkan ke pembuangan. Sebuah venturi scrubber terdiri dari 3 bagian, yaitu *converging*, *throat* dan *diverging*. Gas *exhaust* masuk menuju bagian *converging*. Liquid pencuci gas dimasukkan pada bagian *throat* atau pintu masuk menuju bagian *converging*. Gas *exhaust* yang dipaksa masuk dengan kecepatan sangat tinggi pada bagian *throat* yang sangat kecil, menyemprot liquid pada dinding venturi dan menghasilkan droplet sangat kecil dalam jumlah yang banyak. Pemisahan partikel dan gas terjadi pada bagian throat dimana gas *exhaust* bercampur dengan kabut

droplet dari *scrubbing liquid*. Gas *exhaust* kemudian keluar menuju bagian *diverging* dimana bagian *diverging* gas dipaksa untuk melambat.



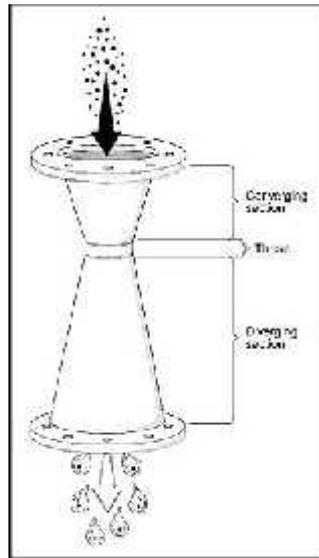
*Venturi scrubber* memberikan keuntungan lebih dalam pemisahan dan pembuatan ulang kabut air dibandingkan dengan metode pembersih gas lainnya. *Venturi scrubber* memiliki desain yang sederhana namun memiliki efisiensi yang tinggi.

Keuntungan :

1. Sederhana, dengan mudah disesuaikan dengan pengaturan tekanan pada *throat* untuk efisiensi maksimum.
2. Mempunyai ketahanan terhadap temperatur dan korosi yang tinggi.
3. Dapat difungsikan pada konsentrasi pengotor yang tinggi sebagai pembuangan air.

### 2.3.2 Prinsip Dasar *Venturi Scrubber*

*Venturi scrubber* merupakan suatu variasi peralatan yang besar untuk pemisahan zat padat atau cairan dari gas dengan menggunakan air untuk menggosok partikel dari gas itu. Scrubber dapat juga dikatakan berfungsi untuk mengurangi polutan udara yang dihasilkan oleh gas buang suatu industri. Air adalah cairan yang pada umumnya digunakan dalam proses scrubbing. Pada umumnya, scrubber mampu menghasilkan partikel dengan ukuran 5  $\mu$  diameter. Namun ada yang lebih spesifik yaitu mampu menghasilkan partikel dengan ukuran 1  $\mu$  - 2 $\mu$  diameter.



**Gambar 2.** *Venturi Scrubber*

Sumber : Gerals T.Joseph,Scrubber System Operation Review Self-Instruction Manual ,North Carolina State University

### 2.3.3 Perhitungan Efisiensi *Venturi scrubber*

Efisiensi kinerja *venturi scrubber* bertujuan untuk mengetahui kemampuan *venturi scrubber* dalam mengurangi kandungan tar yang dihasilkan *updraft gasifier*. Efisiensi kinerja *venturi scrubber* akan dipengaruhi oleh parameter kondisi operasi *updraft gasifier*. Efisiensi terbesar dihasilkan saat *venturi scrubber* bekerja pada kondisi yang optimal dalam mengurangi kandungan tar yang dihasilkan *updraft gasifier*. Untuk menghitung efisiensi *venturi scrubber* dalam mengurangi kandungan tar, dapat digunakan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\% \text{ efisiensi} = \frac{M - M_b}{M} \times 100\% \quad (\text{Sumber : Sianipar,2012:48})$$

Dimana :

$M_a$  = kandungan tar sebelum melewati *venturi scrubber*

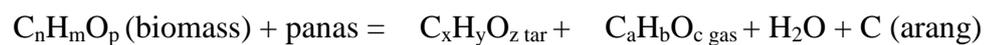
$M_b$  = kandungan tar setelah melewati *venturi scrubber*

## 2.4 Proses Pembentukan Tar

Tar adalah salah satu pengotor yang paling merugikan dan harus dihindari karena sifatnya korosif. Selain itu, tar memiliki bau yang tajam dan dapat mengganggu pernapasan. Secara visual tar dapat kita lihat berwarna hitam pekat

dan kental. 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  $1 \text{ g/m}^3$ .

Pada *gasifier* jenis *updraft* tingkat kandungan tar relatif tinggi. Tar yang dihasilkan oleh *updraft* bersifat primari. Tar terbentuk pada zona pirolisis dan hasil produk sampingan dari proses gasifikasi. Proses pembentukan secara kimia dapat di definisikan:



Proses pembentukan tar bergantung pada dua faktor. Faktor-faktor tersebut adalah faktor temperatur, dan tinggi reaktor. Saat temperatur rendah (dibawah  $500^\circ\text{C}$ ), produksi tar awalnya meningkat, lalu kemudian menurun seiring dengan semakin tingginya temperatur. Dengan begitu dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur, produksi tar akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan pada temperature tinggi, tar akan mengalami proses *cracking*. Proses *cracking* adalah proses dimana tar berubah menjadi gas seperti  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Setiap alat gasifikasi memiliki karakteristiknya masing-masing sehingga mempengaruhi hasil dari reaksi yang terjadi pada alat-alat gasifikasi tersebut. Berikut ini adalah tabel perbedaan kadar tar pada gasifikasi biomassa.

**Tabel 2.** Kandungan Tar pada Gasifikasi

Jenis Gasifikasi	Rata-Rata Konsentrasi Tar dalam Produk ( $\text{gr/Nm}^3$ )	Persentase Tar pada Bahan Bakar Biomassa
Downdraft	<1	<2
Fluidized Bed	10	1-5
Updraft	50	10-20

Sumber : Kurniawan, 2012

Pengaruh tinggi reaktor terhadap produksi tar berhubungan dengan residence time. Semakin lama gas berada di dalam reaktor, semakin banyak pula tar yang mengalami proses *cracking* dalam temperatur yang sama. Dengan semakin besarnya *residence time*, semakin rendah pula temperatur yang dibutuhkan untuk membuat tar mengalami proses *cracking*. *Residence time* dari gas dapat ditingkatkan dengan memperbesar reaktor atau menambah tinggi reaktor. Hal ini sangat berbeda dengan *downdraft*. Pada *downdraft* gas hasil pengeringan akan di tarik kebawah, sehingga tar mengalami pemanasan kembali yang mengakibatkan temperatur tar meningkat sehingga massa tar berkurang.

## 2.5 Perhitungan Kandungan Tar dalam Syngas

### 2.5.1 Kandungan Tar dalam Syngas Masuk *Venturi scrubber*

Tar yang terkandung dalam *syngas* yang masuk ke *venturi scrubber* merupakan tar yang terbawa *syngas* keluar reaktor, yang di hasilkan pada proses pirolisis dalam reaktor. Persamaan yang digunakan sebagai berikut :

$$\text{Kandungan tar} = \frac{m_t}{v_s} \quad (\text{m}^3) \quad (\text{Sumber : Sianipar, 2012:48})$$

### 2.5.2 Kandungan Tar dalam Syngas Keluar *Venturi scrubber*

Tar yang terkandung dalam *syngas* keluar dari *venturi scrubber* merupakan sisa tar yang tidak tertangkap oleh air. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\text{Kandungan tar} = \frac{m_t m_v - m_t k v}{v_s} \quad (\text{m}^3) \quad (\text{Sumber : Sianipar, 2012:48})$$

## 2.6 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. Tempurung kelapa dikategorikan sebagai kayu keras dengan kadar air sekitar 6-9 % (dihitung berdasarkan berat kering). 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.. Berikut data komposisi kimia tempurung kelapa dapat dilihat pada tabel 3.

**Tabel 3.** Komposisi Kimia Tempurung Kelapa

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

*Sumber: Najib, et al, 2012*

Produksi kelapa khususnya di Sumatera Selatan cukup berpotensi. Data 5 tahun terakhir produksi kelapa dapat dilihat pada tabel 4.

**Tabel 4.** Produksi Kelapa Menurut Provinsi Sumatera Selatan, 2009 - 2013

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

*Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan, 2014*

Berdasarkan tabel 4, terjadi peningkatan produksi di Sumatera Selatan sebesar 1,19 %. Dengan melihat pertumbuhan tersebut maka tempurung kelapa cukup berpotensi untuk dijadikan bahan baku proses gasifikasi. Dari 1,1 juta ton/tahun tempurung dengan kemungkinan energi yang dapat dihasilkan 18,7 x 10<sup>6</sup> GJ/tahun (Ihsan, *et al*, 2012). Selain itu, kandungan karbon yang terkandung dalam tempurung kelapa cukup besar seperti ditunjukkan hasil analisa *ultimate* pada tabel 5.

**Tabel 5.** Hasil Pengujian *Ultimate*, *Proximate*, dan *Lower Heat Value* (LHV) Tempurung Kelapa

<b>Komponen</b>	<b>Analisa Ultimate (%w)</b>	<b>Analisa Proximate (%w)</b>	<b>Nilai Kalor Tempurung Kelapa (KJ/kg)</b>
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, 2012

## 2.7 Orifice Meter

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. 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.

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.

Untuk menghitung besar flowrate aliran fluida yang masuk ke dalam pipa, maka diasumsikan alirannya adalah steady-state, densitas fluida konstan, aliran fluida laminar (tidak ada perubahan elevasi), dan kerugian akibat gesekan diabaikan. Kemudian gunakan persamaan Bernoulli seperti di bawah ini :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 220})$$

Dimana:

$P_1$  = tekanan fluida hulu (Pa)

$V_1$  = kecepatan hulu (m/s)

$P_2$  = tekanan fluida hilir (Pa)

$V_2$  = kecepatan fluida pada orifis

$\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

Dengan persamaan kontinuitas

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 220})$$

Dimana:

$A_1$  = luas penampang pipa ( $\text{m}^2$ )

$Q$  = aliran volumetric ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A_2$  = luas lubang orifis ( $\text{m}^2$ )

Sehingga

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_1}\right)^2 \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 221})$$

Kemudian didapatkan Q sebesar

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 221})$$

Kemudian masukan nilai Cd yaitu nilai koefisien debit dalam perhitungan ini dapat digunakan  $C_d = 0,6$  sedangkan  $\beta = d_2/d_1$  sehingga diperoleh persamaan

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 221})$$

$C_d$  = koefisien debit

$\beta$  = rasio diameter lubang orifis-pipa

Parameter - parameter pada persamaan di atas sudah dapat dicari menggunakan alat orifis sehingga dapat dihitung besar debit ( $Q$ ) dengan menggunakan persamaan di atas. Untuk mencari laju aliran masa ( ), maka nilai  $Q$  dapat langsung dikalikan dengan rho ( $\rho$ ) fluida yang mengalir, atau dapat gunakan rumus dibawah ini :

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (\text{Mc Cabe et.al., 1993 : 221})$$

Dimana:

= laju aliran masa ( $\text{kg/s}$ )