

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Biomassa

Biomassa adalah bahan bakar yang dapat diperbaharui dan secara umum berasal dari makhluk hidup (non-fosil) yang didalamnya tersimpan energi atau dalam definisi lain, biomassa merupakan keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup, termasuk bahan organik yang hidup maupun yang mati, baik di atas permukaan tanah maupun yang ada di bawah permukaan tanah. Biomassa merupakan produk fotosintesa dimana energi yang diserap digunakan untuk mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen. Biomassa bersifat mudah didapatkan, ramah lingkungan dan terbarukan. Secara umum potensi energi biomassa berasal dari limbah tujuh komoditif yang berasal dari sektor kehutanan, perkebunan dan pertanian. Potensi limbah biomassa terbesar adalah dari limbah kayu hutan, kemudian diikuti oleh limbah padi, jagung, ubi kayu, kelapa, kelapa sawit dan tebu. Secara keseluruhan potensi energi limbah biomassa Indonesia diperkirakan sebesar 49.807,43 MW. Dari jumlah tersebut, kapasitas terpasang hanya sekitar 178 MW atau 0,36% dari potensi yang ada (Hendrison, 2003; Agustina, 2004). Biomassa merupakan bahan energi yang dapat diperbaharui karena dapat diproduksi dengan cepat. Karena itu bahan organik yang diproses melalui proses geologi seperti minyak dan batubara tidak dapat digolongkan dalam kelompok biomassa. Biomassa umumnya mempunyai kadar volatile relatif tinggi, dengan kadar karbon tetap yang rendah dan kadar abu lebih rendah dibandingkan batubara. Biomassa juga memiliki kadar volatil yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar volatile batubara, sehingga biomassa lebih reaktif dibandingkan batubara.

Teknologi biomassa telah diterapkan sejak zaman dahulu dan telah mengalami banyak perkembangan. Biomassa memegang peran penting dalam menyelamatkan kelangsungan energi di bumi ditinjau dari pengaruhnya terhadap kelestarian lingkungan. Sifat biomassa yang merupakan energi dengan kategori sumber energi terbarukan mendorong penggunaannya menuju ke skala yang lebih

besar lagi sehingga manusia tidak hanya tergantung dengan energi fosil. Biomassa memiliki kelebihan yang memberi pandangan positif terhadap keberadaan energi ini sebagai alternatif energi pengganti energi fosil. Beberapa kelebihan itu antara lain, biomassa dapat mengurangi efek rumah kaca, mengurangi limbah organik, melindungi kebersihan air dan tanah, mengurangi polusi udara, dan mengurangi adanya hujan asam dan kabut asam.

2.2 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, 2008 - 2012

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

Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan, 2014

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 $18,7 \times 10^6$ GJ/tahun (Ihsan, 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, 2012

2.3 Gasifikasi

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO , CH_4 , dan H_2) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara stoikiometri) (Guswendar, 2012). Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material berkarbon menjadi gas mampu bakar. Berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan Gasifikasi merupakan proses konversi bahan bakar yang mengandung karbon menjadi gas yang memiliki nilai bakar pada temperatur tinggi (Pahlevi, 2012). Bahan bakar padat tersebut dapat berupa batubara, ataupun limbah biomassa, yaitu potongan kayu, tempurung kelapa, sekam padi maupun limbah pertanian lainnya. Gas yang diperoleh dari hasil gasifikasi mengandung CO , H_2 , dan CH_4 . 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. Gasi 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.

Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam reaktor gasifikasi yang dikenal dengan nama gasifier. *Gasifier* adalah istilah untuk reaktor yang memproduksi gas produser dengan cara pembakaran tidak sempurna (oksidasi sebagian) bahan bakar biomassa pada temperatur sekitar $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (Hantoko, 2012). 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.

Gasifikasi umumnya terdiri dari empat proses, 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: $800 < T < 1000$ °C
- Oksidasi: $700 < T < 1500$ °C

Proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi bersifat menyerap panas (endotermik), sedangkan proses oksidasi bersifat melepas panas (eksotermik). Pada pengeringan, kandungan air pada bahan bakar padat diuapkan oleh panas yang diserap dari proses oksidasi. 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. Pembakaran mengoksidasi kandungan karbon dan hidrogen yang terdapat pada bahan bakar dengan reaksi eksotermik, sedangkan gasifikasi mereduksi hasil pembakaran menjadi gas bakar dengan reaksi endotermik.

2.4 Faktor Yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi

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

1. Properties Biomass

Apabila ada anggapan bahwa semua jenis biomass dapat dijadikan bahan baku gasifikasi, anggapan tersebut merupakan hal yang naif. Nyatanya tidak semua biomass dapat dikonversikan dengan proses gasifikasi karena ada beberapa klarifikasi dalam mendefinisikan bahan baku yang dipakai pada sistem gasifikasi berdasarkan kandungan dan sifat yang dimilikinya. Pendefinisian bahan bak gasifikasi ini dimaksudkan untuk membedakan antara bahan baku yang baik dan yang kurang baik. Adapun beberapa parameter yang dipakai untuk mengklarifikasinya, yaitu :

a. kandungan energy

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

b. *Moisture*

Bahan baku yang digunakan untuk proses gasifikasi umumnya diharapkan bermoistur 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 organik. Selain itu, tar memiliki bau yang tajam dan dapat mengganggu pernapasan. Pada reaktor gasifikasi terbentuknya tar, yang memiliki bentuk approximate atomic $CH_{1.2}O_{0.5}$, terjadi pada temperatur pirolisis yang kemudian terkondensasi dalam bentuk asap, namun pada beberapa kejadian tar dapat berupa zat cair pada temperatur yang lebih rendah. Apabila hasil gas yang mengandung tar relatif tinggi dipakai pada kendaraan bermotor, dapat menimbulkan deposit pada karburator dan intake valve sehingga menyebabkan gangguan. Desain gasifier yang baik setidaknya menghasilkan tar tidak lebih dari 1 g/m³.

e. Ash dan Slagging

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

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

2. Desain Reaktor

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

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. Pada gasifikasi biomass rasio yang tepat untuk proses gasifikasi berkisar pada angka 1,25 - 1,5.

2.5 Tahapan Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi terdiri dari empat tahapan proses atas dasar perbedaan rentang kondisi temperatur, yaitu pengeringan ($T > 150$ °C), pirolisis ($150 < T < 700$ °C), oksidasi ($700 < T < 1500$ °C), dan reduksi ($800 < T < 1000$ °C) (lihat Gambar 1). Proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi bersifat menyerap panas (endotermik), sedangkan proses oksidasi bersifat melepas panas (eksotermik). Panas yang dihasilkan dalam proses oksidasi digunakan dalam proses pengeringan, pirolisis

dan reduksi. Bahan kering hasil dari proses pengeringan mengalami proses pirolisis, yaitu pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari arang. Hasil pirolisis berupa arang mengalami proses pembakaran dan proses reduksi yang menghasilkan gas produser yaitu, H₂ dan CO (Pranolo, 2010)

1. Proses Pengeringan (*Drying*)

Reaksi ini terletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam reaktor yaitu berkisar antara 100°C – 150°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.

2. Proses Pirolisis

Pada pirolisis, pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari padatan karbon bahan bakar menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi sehingga pirolisis (*devolatilisasi*) disebut juga gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis. Komposisi produk yang tersusun merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, dan komposisi gas selama proses pirolisis berlangsung. Produk cair yang menguap akibat dari fenomena penguapan komponen yang tidak stabil secara termal mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis terdiri atas gas ringan, tar, dan arang.

Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Proses pirolisis pada bahan bakar terbentuk pada temperatur antara 150°C sampai 700°C di dalam reaktor. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa arang atau karbon, tar, gas (CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, dan C₂H₆). Ketika temperatur pada zona pirolisis rendah, maka akan dihasilkan banyak arang dan sedikit cairan (air, hidrokarbon, dan tar). Sebaliknya,

apabila temperatur pirolisis tinggi maka arang yang dihasilkan sedikit tetapi banyak mengandung cairan.

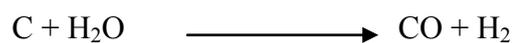
3. Proses Reduksi

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, H₂ dan CH₄ 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. Proses reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

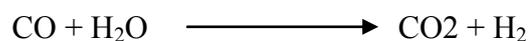
- Bourdour reaction:



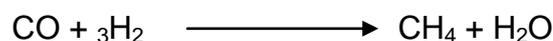
- Steam-carbon reaction :



- Water-gas shift reaction:



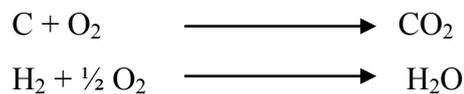
- CO methanation :



4. Proses Oksidasi

Proses pembakaran mengoksidasi kandungan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar dengan reaksi eksotermik, sedangkan gasifikasi mereduksi hasil pembakaran menjadi gas bakar dengan reaksi endotermik. Oksidasi merupakan reaksi terpenting di dalam reaktor gasifikasi karena reaksi ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Proses ini terjadi pada temperatur yang relatif tinggi, umumnya berkisar antara 700 °C sampai 1500 °C. Oksigen yang dipasok ke dalam reaktor bereaksi dengan substansi yang

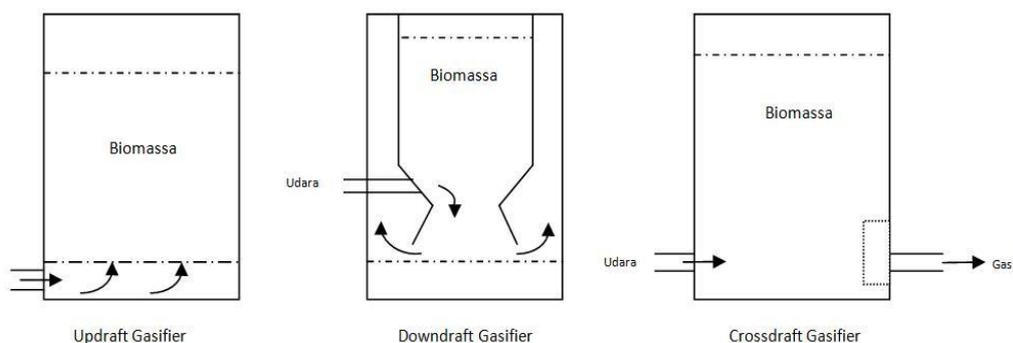
mudah terbakar yang menghasilkan produk berupa CO₂ dan H₂O yang secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada proses pirolisis. Produk lain yang dihasilkan dalam reaksi oksidasi berupa air, panas, cahaya, N₂ dan gas lainnya (SO₂, CO, NO₂, dan lain-lain). Adapun reaksi kimia yang terjadi pada proses oksidasi ini adalah sebagai berikut :



2.6 Jenis Reaktor

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 4.

Tabel 4. Kelebihan dan Kekurangan *Updraft Gasifier*

Tipe <i>Gasifier</i>	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>.

2.7 Udara Pembakaran

Reaksi kimia terjadi ketika ikatan-ikatan molekul dari *reactants* berpisah, kemudian atom-atom dan elektron menyusun kembali membentuk unsur-unsur pokok yang berlainan yang disebut hasil (*products*). Oksidasi yang terjadi secara kontinyu pada bahan bakar menghasilkan pelepasan energi sebagai hasil dari pembakaran. Pembakaran dapat dikatakan sempurna (*stoichiometric*) apabila semua karbon (C) yang terkandung dalam bahan bakar diubah menjadi karbondioksida (CO₂) dan semua hidrogen diubah menjadi air (H₂O) (Irvan Nurtian,2007). Jika salah satu tidak terpenuhi, maka pembakaran tidak sempurna. Syarat terjadinya pembakaran adalah adanya oksigen (O₂). Dalam aplikasi pembakaran yang banyak terjadi, udara menyediakan oksigen yang dibutuhkan. Dua parameter yang sering digunakan untuk menentukan jumlah dari bahan bakar dan udara pada proses pembakaran adalah perbandingan udara bahan. bakar. Perbandingan udara bahan bakar dapat diartikan sebagai jumlah udara dalam

suatu reaksi jumlah bahan bakar. Perbandingan udara bahan bakar dari suatu pembakaran berpengaruh menentukan bagaimana komposisi produk dan juga terhadap jumlah panas yang dilepaskan selama reaksi berlangsung dan dapat ditulis dalam basis mol (*molar basis*) atau basis massa (*mass basis*). Komposisi yang terkandung pada udara kering dapat dilihat dari tabel 5 berikut.

Tabel 5. Komponen-komponen yang Terkandung dalam Udara Kering

Komponen	Fraksi Mol
Nitrogen	78.08
Oksigen	20.95
Argon	0.93
Karbon dioksida	0.03
Neon, Helium, Metana, dll	0.01

Sumber: (Ivan Nurtian, 2007)

2.8 Gas Mampu Bakar (Syngas)

Gas mampu bakar atau yang lebih dikenal Gas Sintetik (*Syngas*) merupakan campuran Hidrogen dan Karbon Monoksida. Kata sintetik gas diartikan sebagai pengganti gas alam yang dalam hal ini terbuat dari gas metana. *Syngas* merupakan bahan baku yang penting untuk industri kimia dan industri pembangkit daya. Kualitas gas produser dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Kualitas Gas Produser dari *Gasifier* Biomassa

	<i>Fixed Bed Co-current Gasifier</i>	<i>Fixed Bed Counter-current Gasifier</i>	<i>CFB Gasifier</i>
CH ₄ (% vol)	1-5	2-3	2-4
CO (% vol)	10-22	15-20	13-15
H ₂ (% vol)	15-21	10-14	15-22

Sumber: Khairuziman, 2008

Nilai LHV bahan bakar dan LHV *Syngas* dapat ditentukan dari komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume *Syngas*. Komposisi masing-masing bahan bakar dan *Syngas* dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Nilai Kalori pada *Syngas*

Gases	H₂	CO	CH₄
HHV (MJ/Nm ³) ₂	12,74	12,63	39,82
LHV (MJ/Nm ³) ₂	10,78	12,63	35,88
Viscosity ($\mu\rho$)	90	182	112
Thermal Conductivity (W/m.K)	0,1820	0,0251	0,0343
Specific Heat (kJ/Kg.K)	3,467	1,05	2,226

Sumber: Kurniawan, 2012

2.9 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.

2.9.1 Perhitungan Kesetimbangan Massa

Perhitungan kesetimbangan 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.

a. Laju aliran syngas

$$Vg = \frac{Q}{LHVg}$$

Dimana:

Vg = Laju aliran syngas (m³/s)

Q = Energi kalor *output* yang dibutuhkan (kkal/s)

$LHVg$ = *Low Heating Value* syngas (kkal/m³)

b. Laju konsumsi bahan bakar

$$Mf = \frac{Q}{LHVf \times \eta_{gef}}$$

Dimana :

Mf = Laju konsumsi bahan bakar (kg/s)

Q = Energi kalor *output* yang dibutuhkan (kkal/s)

$LHVf$ = *Low Heating Value* bahan bakar(kkal/m³)

Gef = Efisiensi *gasifier*

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. Menurutnya jumlah arang sisa sangat dipengaruhi oleh reaksi pembakaran arang dan juga reaksi gasifikasi arang dalam reaktor, dimana keduanya mempengaruhi satu sama lain karena sebagian besar reaksi gasifikasi adalah reaksi endotermik.

c. Laju Alir Abu (*Ash*)

$$\dot{M}_{Abu} = \frac{m_{abu} (kg)}{t (s)}$$

Dimana :

\dot{M}_{Abu} = Laju alir abu (Kg/s)

m_{Abu} = massa Abu (Kg)

t = waktu (s)

d. Laju Aliran Udara

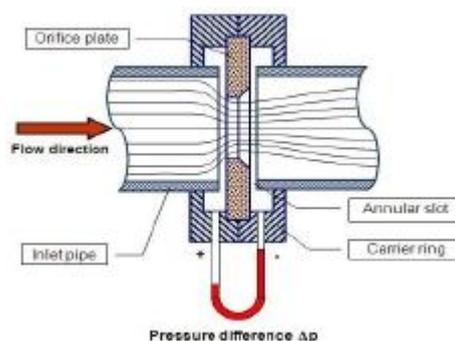
Kebutuhan jumlah udara gasifikasi selalu lebih kecil dari pada kebutuhan jumlah udara stoikiometri (pembakaran sempurna). Jumlah udara gasifikasi sangat tergantung pada reaksi pembakaran masing-masing unsur yang terkandung dalam satuan massa bahan bakar dengan udara secara sempurna dan *Equivalence Ratio* (ER).

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

Sumber: Zainal, 2003

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 2. Mekanisme kerja orifis



Sumber: Rinovianto, 2012

Agar 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 :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2$$

Dimana :

P1 = tekanan fluida hulu (Pa)

V1 = kecepatan hulu (m/s)

P2 = tekanan fluida hilir (Pa)

V2 = kecepatan fluida pada orifis

ρ = densitas fluida (kg/m³)

Dengan persamaan kontinuitas

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Dimana :

A1 = luas penampang pipa (m²)

A2 = luas lubang orifis (m²)

Q = aliran volumetric (m³/s)

Sehingga

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_1}\right)^2$$

Kemudian didapatkan Q sebesar :

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - (A_2/A_1)^2}}$$

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

$$Q = C_d A_2 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Dimana :

Cd = koefisien debit

β = 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 (\dot{m}), maka nilai Q dapat langsung dikalikan dengan rho (ρ) fluida yang mengalir, atau dapat gunakan rumus dibawah ini :

$$\dot{M} = \rho \cdot Q$$

\dot{m} = laju aliran masa (kg/s)

e. Massa Jenis Syngas

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

$$P_{mix} = \frac{P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n}{X_1 + X_2 + \dots + X_3}$$

Dimana :

1.....

x1..... x2 = fraksi mol dari tiap komponen gas

f. Laju aliran syngas

Perhitungan laju alir syngas dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = C_d A_2 \frac{1}{1-\beta^4} \frac{2(P_1-P_2)}{\rho}$$

Dimana :

C_d = koefisien debit

B = rasio diameter lubang orifis-pipa

2 = massa jenis dari tiap komponen (Kg/m³)

A = $d^2/4$ (Luas permukaan pelat *orifice*)

ΔP = perbedaan tekanan akibat orifice (kg/m²)

P_{mix} = massa jenis syngas (kg/m³)

• Massa laju alir syngas dapat dihitung :

$$\dot{M}_{syngas} = Q_{syngas} \cdot \rho_{mix}$$

2.9.2 Perhitungan Kestimbangan Energi (*Energy Balance*)

Pada dasarnya energi yang diinputkan berasal dari entalpi yang dihasilkan oleh bahan bakar pada temperatur tertentu ditambah dengan nilai kalor bahan bakar dan *heat* dari luar. Sedangkan energi *output* merupakan jumlah entalpi dari syngas yang dihasilkan ditambah dengan nilai kalor dari syngas dan *heat losses*

yang dihasilkan selama proses gasifikasi. Proses pembakaran melepaskan sejumlah energi yang kemudian diterima oleh bahan bakar untuk melakukan proses pirolisis dan pengeringan. Selain itu, energi tersebut juga digunakan pada proses reduksi untuk menghasilkan *syngas*. Sedangkan sisanya merupakan energi yang tidak dimanfaatkan seperti arang dan energi yang dilepaskan ke lingkungan secara radiasi, konveksi, dan konduksi. Sedangkan parameter yang terkait dengan proses gasifikasi adalah :

a. *Specific Gasification Rate (SGR)*

SGR merupakan jumlah bahan bakar yang tergasifikasi melalui sebuah *throat* dengan luas penampang tertentu. SGR sering disebut juga dengan nama *hearth load* dengan terminologi jumlah bahan bakar yang tergasifikasi. SGR dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{SGR (Heart Load)} = \frac{\dot{m}_{bb}}{A}$$

Dimana :

SGR = *Specific Gasification Rate* (kg/ m²h)

\dot{m}_{bb} = Laju aliran massa bahan bakar (kg/h)

V_{syngas} = Laju aliran *syngas* (m³/h)

A = Luas penampang *throat* (m²)

b. *Specific gas Production Rate (SGPR)*

SGPR juga dapat dikatakan *hearth load* dengan terminologi jumlah *syngas* yang dihasilkan melalui luas area *throat*. Besarnya laju aliran *syngas* melalui *throat* akan sangat dipengaruhi oleh jumlah bahan bakar yang masuk. Perbandingan antara jumlah bahan bakar dengan jumlah *syngas* yang dihasilkan akan sama dengan perbandingan antara nilai SGR dan SGPR. SGPR dinyatakan dalam persamaan :

$$\text{SGPR (Heart Load)} = \frac{V_{syngas}}{A}$$

Dimana :

SGPR = *Specific Gas Production Rate* (m³/m²h)

V_{syngas} = Laju aliran *syngas* (m³/h)

A = Luas penampang *throat* (m²)

e. Perhitungan *Cold Gas Efficiency*

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 (dibakar secara sempurna). Persamaan berikut ini digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi (Mathieu, Phillippe. 2002).

$$n = \frac{\text{flowrate syngas } \frac{m^3}{s} \times \text{LHV syngas } \left(\frac{k\text{kal}}{kg}\right)}{\text{mass flowrate bahan bakar } \frac{kg}{s} \times \text{LHV bahan bakar } \left(\frac{k\text{kal}}{kg}\right)}$$

(Anil Kr, 2000)

f. Nilai Kalor LHV (*Low Heating Value*)

Bahan bakar yang digunakan dalam setiap proses pembakaran memiliki nilai kalor yang berbeda-beda satu sama lain. Nilai kalor merupakan jumlah kalor yang dapat dilepaskan oleh sejumlah unit massa atau volume bahan bakar dalam reaksi pembakaran sampai temperatur bahan bakar setelah pembakaran sama dengan temperatur awal bahan bakar. Nilai kalor suatu bahan bakar dapat dibedakan atas dua macam yaitu *High Heating Value* (HHV) dan *Low Heating Value* (LHV). HHV adalah jumlah kalor yang dapat dilepaskan oleh sejumlah unit massa atau volume bahan bakar dalam reaksi pembakaran sampai temperature bahan bakar setelah pembakaran sama dengan temperatur awal bahan bakar dan disertai dengan kalor laten penguapan air sedangkan LHV tidak disertai dengan kalor laten penguapan air. Pengujian *proximate* dan *ultimate* dapat digunakan untuk menentukan nilai kalor yang terkandung dalam suatu bahan bakar.

Jika terdapat sejumlah massa bahan bakar (mf) kg dengan kandungan kalor (Q) KJ, Mw kandungan Uap air dan mash kandungan abu, maka HHV dapat ditulis dalam bentuk bentuk sebagai berikut :

$$\text{HHV}_{\text{ar}} = \frac{Q}{m_f} \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KG}} \right)$$

$$\text{HHV}_{\text{db}} = \frac{Q}{m_f - m_w} \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KG}} \right)$$

$$\text{HHV}_{\text{db}} = \frac{Q}{m_f - m_w - \text{Mash}} \left(\frac{\text{KJ}}{\text{KG}} \right)$$

Sedangkan untuk persamaan LHV dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{CV G} = \sum x_i h_i$$

Sumber: Anil Kr, 2000

X_i = fraksi volume (konsentrasi) dari unsur gas hasil pada temperatur ruang

H_i = lower heating value dari unsur gas hasil pada temperatur ruang

2.10 Sistem Pembersihan Gas

Gas hasil pembakaran dalam gasifier biasanya masih bercampur dengan berbagai unsur yang tidak diperlukan dan gas keluaran masih memiliki temperature tinggi. 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 dengan cara melewatkan dalam suatu unit penyaring (filtrasi). 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, kelembabab dari gas, temperatur gas serta produk distilasi yaitu tar, minyak serta gas-gas yang tidak terkondensasi dan uap air.

2.10.1. Venturi Scrubber

Venturi scrubber masuk ke dalam jenis *wet scrubber*. *Wet scrubber* Adalah suatu peralatan pengendali polutan yang berfungsi untuk mengumpulkan partikel partikel halus yang terbawa dalam gas buang suatu proses dengan menggunakan liquid untuk membuang polutan tersebut. Pada pengolahan ini, umumnya liquid yang digunakan adalah air. *Venturi scrubber* menggunakan prinsip differensial antara gas yang memiliki kecepatan yang tinggi dan

aliranbeban dari air untuk membuat droplet-droplet yang akan menangkap pengotor dan membuat pengotor terkumpul seperti kumoulan 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.

Sebagai alat pengendali partikel, *Wet Scrubber* memiliki beberapa keunggulan, yaitu :

- Memiliki kemampuan untuk mengatasi temoeratur dan kelembaban tinggi
- Menghasilkan kebutuhan ukuran peralatan yang lebih kecil secara Keseluruhan

Keseluruhan

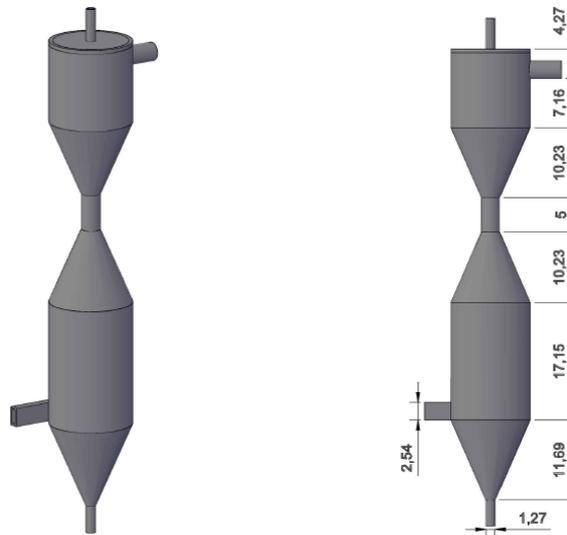
- Dapat membuang baik polutan gas maupun partikel padat
- Wet scrubber dapat menetralkan gas yang korosif

Terdapat banyak konfigurasi srubber dan sistem scrubber, semuanya didesain untuk menyediakan kontak yang baik antara liquid dan gas kotor.

- *Counter Current Wet Venturi Scrubber*

Counter current venturi wet scrubber dibuat dari material pipa *carbon steel* dengan ketebalan 5 mm. Pemilihan material ini karena *carbon steel* merupakan logam yang cukup tahan terhadap korosi mengingat proses yang terjadi di dalam *wet srubber* adalah pencampuran air dan gas kotor. Total tinggi *counter current wet venturi scrubber* ini adalah 639 mm dengan total lebar 114 mm.

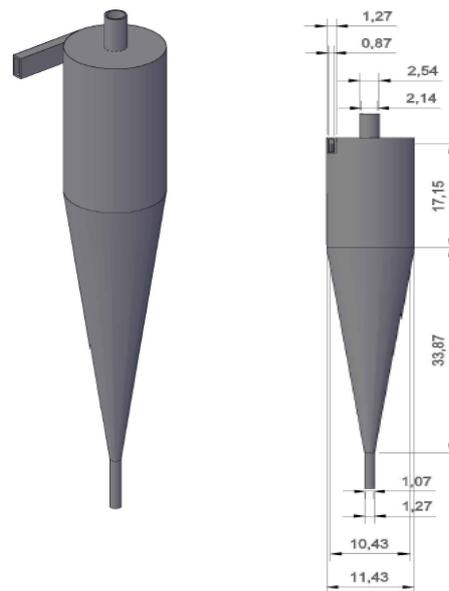
Untuk mensuplai air ke dalam *counter current venturi wet scrubber* digunakan pompa yang terhubung ke *water sprayer*. Air dialirkan dari atas *venturi* sehingga partikulat pengotor akan terikat oleh air karena kontak yang terjadi.



Gambar 3. *Counter Current Wet Venturi Scrubber*

2.10.2 Cyclone Separator

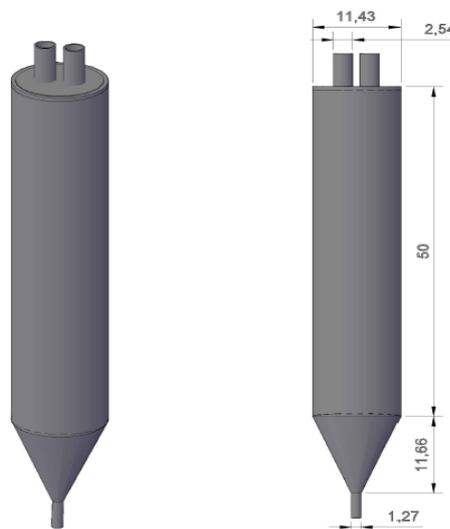
Cyclone separator adalah salah satu alat yang paling banyak digunakan sebagai pemisah gas-padat maupun. Efisiensi dari *cyclone separator* sangat baik untuk partikel-partikel yang diameternya lebih besar dari $5 \mu\text{m}$ dengan tingkat efisiensi pemisahan mencapai 80% (Guan et all. 2008). *Cyclone separator* dalam rancang bangun ini diaplikasikan sebagai *precleaner* yaitu pemisah *syngas* dengan tar dan partikulat terikat sebelum *syngas* memasuki *counter current wet venturi scrubber*. Total tinggi *cyclone separator* ini adalah 510,2 mm dengan total lebar 114,3 mm sedangkan material yang digunakan berupa *carbon steel*.



Gambar 4. *Cyclone Separator*

2.10.3 Synthetic Gas Washer (Wet Impinger Tube)

Wet impinger dirancang untuk mereduksi partikulat maupun tar yang masih terikat bersama *syngas* dengan cara memposisikan nozzle keluaran dari venturi ke dalam air. Diameter dan panjang dari *wet impinger* masing-masing 114,3 mm dan 616,6 mm sedangkan diameter nozzle adalah 25,4 mm. Jarak antara permukaan air dan nozzle disimpan 200 mm.



Gambar 5. *Synthetic Gas Washer (Wet Impinger Tube)*