

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara adalah batuan sedimen (padatan) yang dapat terbakar, berwarna coklat sampai hitam yang selanjutnya terkena proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun sehingga mengakibatkan pengkayaan kandungan karbonnya. (Anggayana, 2002)

Mutu dari setiap endapan batubara ditentukan oleh suhu dan tekanan serta lama waktu pembentukan, yang disebut sebagai ‘maturitas organik’.

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batubara umumnya dibagi dalam beberapa kelas yaitu:

a. Lignit

Lignit merupakan batubara peringkat rendah dimana kedudukan lignit dalam tingkat klasifikasi batubara berada pada daerah transisi dari jenis gambut ke batubara.

Lignit adalah batubara yang berwarna hitam dan memiliki tekstur seperti kayu. Sifat batubara jenis lignit :

1. Warna hitam, sangat rapuh
2. Nilai kalor rendah, kandungan karbon sedikit
3. Kandungan air tinggi
4. Kandungan abu banyak
5. Kandungan sulfur banyak (Sukandarrumidi, 2006)

b. Sub-Bituminus

Batubara jenis ini merupakan peralihan antara jenis lignit dan bituminus. Batubara jenis ini memiliki warna hitam yang mempunyai kandungan air, zat terbang, dan oksigen yang tinggi serta memiliki kandungan karbon yang rendah. Sifat-sifat tersebut menunjukkan bahwa batubara jenis sub-bituminus ini merupakan batubara tingkat rendah.

c. Bituminus

Batubara jenis ini merupakan batubara yang berwarna hitam dengan tekstur ikatan yang baik. Sifat batubara jenis bituminus:

1. Warna hitam mengkilat, kurang kompak
2. Nilai kalor tinggi, kandungan karbon relatif tinggi
3. Kandungan air sedikit
4. Kandungan abu sedikit
5. Kandungan sulfur sedikit

d. Antrasit

Antrasit merupakan batubara paling tinggi tingkatan yang mempunyai kandungan karbon lebih dari 93% dan kandungan zat terbang kurang dari 10%. Antrasit umumnya lebih keras, kuat dan seringkali berwarna hitam mengkilat seperti kaca (Yunita, 2000). Sifat batubara jenis antrasit :

1. Warna hitam sangat mengkilat, kompak
2. Nilai kalor sangat tinggi, kandungan karbon sangat tinggi
3. Kandungan air sangat sedikit
4. Kandungan abu sangat sedikit
5. Kandungan sulfur sangat sedikit

2.1.1 Karakterisasi Batubara

Batubara memiliki jenis dan komposisi yang berbeda-beda, maka dari diperlukannya pengujian kandungan batubara secara *proximate* dan *ultimate* untuk mengetahui karakter dan komposisi dari batubara. Pada gambar 2.1 dan 2.2 juga ditampilkan analisa *proximate* dan *ultimate* dari berbagai macam batubara, dimana analisa *proximate* berupa *moisture*, *volatile matter*, *fixed carbon*, *Ash* dan analisa *ultimate* menyatakan komposisi karbon, hidrogen, nitrogen, belerang dan oksigen.

Tabel 2.1 Nilai Analisa Setiap Jenis Batubara

	Anthracite	Bituminous	Subbituminous	Lignite
Moisture (%)	3-6	2-15	10-25	25-45
Volatile Matter (%)	2-12	15-45	28-45	24-32
Fixed Carbon (%)	75-85	50-70	30-57	25-30
Ash (%)	4-15	4-15	3-10	3-15
Sulfur (%)	0.5-2.5	0.5-6	0.3-1.5	0.3-2.5
Hydrogen (%)	1.5-3.5	4.5-6	5.5-6.5	6-7.5
Carbon (%)	75-85	65-80	55-70	35-45
Nitrogen (%)	0.5-1	0.5-2.5	0.8-1.5	0.6-1.0
Oxygen (%)	5.5-9	4.5-10	15-30	38-48
Btu/lb	12.000-13.500	12.000-14.500	7500-10.000	6000-7500
Denstiy (g/mL)	1.35-1.70	1.28-1.35	1.35-1.40	1.40-1.45

(Sumber : *Handbook of Coal Analysis, 2005*)

Tabel 2.2 Nilai Analisa Ultimate Setiap Jenis Batubara

	< -----Low Rank ----- >	< ----- High Rank ----- >		
Rank:	Lignite	Subbituminous	Bituminous	Anthracite
Age:	-----increases----- >			
% Carbon:	65-72	72-76	76-90	90-95
% Hydrogen:	~5-----decreases----- ~2			
% Nitrogen:	< ----- ~1-2 ----- >			
% Oxygen:	~30 -----decreases----- ~1			
% Sulfur:	~0 ----- increases ----- ~4 --- decreases --- ~0			
% Water:	70-30	30-10	10-5	~5
Heating Value (BTU/lb) :	~7000	~10.000	12.000-15.000	~15.000

(Sumber : Simon, 2019)

2.2 Ampas Tebu

Ampas tebu adalah salah satu energi alternatif yang dapat digunakan untuk menanggulangi krisis energi yang terjadi saat ini. Energi ampas tebu tidak hanya jumlahnya berlimpah tetapi juga merupakan energi terbarukan. Dari satu pabrik dihasilkan ampas tebu sekitar 35 – 40% dari berat tebu yang digiling. Pada musim giling 2006 lalu, data yang diperoleh dari Ikatan Ahli Gula Indonesia (Ikagi) menunjukkan bahwa jumlah tebu yang digiling oleh 57 pabrik gula di Indonesia mencapai sekitar 30 juta ton, sehingga ampas tebu yang dihasilkan diperkirakan mencapai 10 juta ton (Suprpta Winaya & Darma Susila, 2010).

2.2.1 Karakterisasi Ampas Tebu

Berikut karakteristik biomassa ampas tebu berupa analisa proximate dan ultimate yang diambil dari jurnal “Uji Perfoma Tungku Gasifikasi Untuk Pirolisis Gas Metan Dari Ampas Tebu” Universitas Muhammadiyah Palembang

Tabel 2.3 Nilai Analisa Proksimate dan Ultimate Ampas Tebu

No.	Analisis	Total
1.	Nilai Kalor	1830 kkal/kg
2.	<i>Proximate Analysis</i>	
	a. Total Moisture (%w)	15,32
	b. Kadar Abu (%w)	4,19
	c. Kadar Zat Terbang (%w)	43,68
	d. Fixed Carbon (%w)	36,81
	e. Total Sulfur (%w)	0,04
3.	<i>Ultimate Analysis</i>	
	a. Karbon (%w)	24,12
	b. Hidrogen (%w)	3,12
	c. Nitrogen (%w)	0,12
	d. Oksigen (%w)	5

(Sumber : Rizal,et al., 2020)

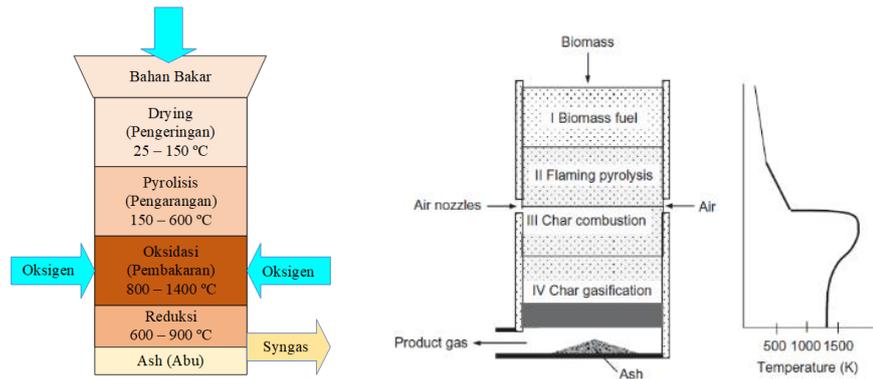
2.3 Gasifikasi

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO, CH₄, dan H₂) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara stoikiometri). Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material yang mengandung karbon menjadi *gas* mampu bakar. Berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan untuk proses *gasifikasi* menggunakan material yang mengandung hidrokarbon seperti batubara, *petcoke* (*petroleum coke*), dan biomassa. (Rinovianto, 2012)

2.3.1. Gasifikasi Downdraft

Berdasarkan arah alirannya, gasifier dapat dibedakan menjadi gasifikasi aliran searah (*Downdraft Gasification*), gasifikasi aliran berlawanan (*Updraft Gasification*), dan gasifikasi aliran menyilang (*Crossdraft Gasification*).

Sebuah gasifier downdraft adalah reaktor di mana arah aliran udara dan bahan baku sama-sama menuju bawah. Gas produk mengalir ke bawah (memberikan nama downdraft) dan gas keluar dari bagian bawah gasifier.(Trifiananto, 2015)



Gambar 2.1 Skema Downdraft
(Sumber : Prabir Basu, 2013)

2.4 Tahap Gasifikasi

Gasifikasi umumnya terdiri dari empat proses, yaitu pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi. Proses yang berlangsung pada gasifier dapat diamati dari rentang temperatur masing-masing proses, yaitu :

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

Penjelasan lebih lanjut mengenai proses-proses tersebut disampaikan pada uraian berikut ini :

a. Proses Pengeringan

Reaksi ini terletak pada bagian atas reaktor dan merupakan zona dengan temperatur paling rendah di dalam reaktor yaitu di bawah 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 kan dihilangkan dengan cara diuapkan dan dibutuhkan energi sekitar 2260 kJ untuk melakukan proses tersebut sehingga cukup menyita waktu operasi.

b. Pirolisis

Pirolisis atau devolatilisasi disebut juga sebagai gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis yang dimulai secara lambat pada $T < 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan terjadi secara cepat pada $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selama pirolisis, kelembaban menguap pertama kali (100°C), kemudian hemiselulosa terdekomposisi ($200\text{-}260^{\circ}\text{C}$), diikuti oleh selulosa

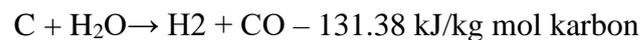
(240-340°C) dan lignin (280-500°C). Produk cair yang menguap mengandung tar dan PAH (polyaromatic hydrocarbon). Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2 , CO, CO_2 , H_2O , dan CH_4), tar, dan arang.

c. 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_2 dan CH_4 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

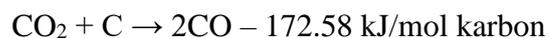
Water-gas reaction merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh kukus yang dapat berasal dari bahan bakar padat itu sendiri (hasil pirolisis) maupun dari sumber yang berbeda, seperti uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air. Reaksi yang terjadi pada water-gas reaction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



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

2. Boudouard reaction

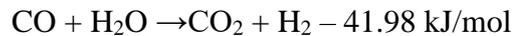
Boudouard reaction merupakan reaksi antara karbondioksida yang terdapat di dalam gasifier dengan arang untuk menghasilkan CO. Reaksi yang terjadi pada Boudouard reaction adalah:



3. Shift conversion

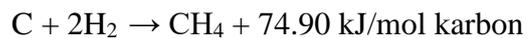
Shift conversion merupakan reaksi reduksi karbonmonoksida oleh kukus untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini dikenal sebagai water-gas

shift yang menghasilkan peningkatan perbandingan hidrogen terhadap karbonmonoksida pada gas produser. Reaksi ini digunakan pada pembuatan gas sintetik. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



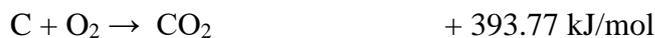
4. Methanation

Methanation merupakan reaksi pembentukan gas metan. Reaksi yang terjadi pada methanation adalah:



d. Oksidasi

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_2 dan H_2O 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:



2.5 Gasifying Agent

Salah satu yang berpengaruh dalam gasifikasi adalah media gasifikasi (gasifying agent). Gasifying agent utama yang sering digunakan adalah oksigen O_2 , uap air H_2O , dan udara. Jika gasifying agent yang digunakan adalah oksigen O_2 dan ketika oksigen yang disuplai kurang, maka produk yang dihasilkan adalah CO dan ketika oksigen yang diberikan berlebih akan ketika menghasilkan CO_2 . (Pambudi, 2015)

Jika jumlah oksigen O_2 yang diberikan melebihi keadaan stoikiometri maka proses gasifikasi akan bergeser menjadi pembakaran biasa dan produk yang dihasilkan adalah gas sisa (flue gas). Tidak satupun

flue gas dapat dibakar kembali meskipun dilakukan perlakuan seperti seperti perlakuan panas.(Basu, 2013)

Tabel 2.4 Rentang *heating value syn-gas* dengan berbagai jenis gasifying agent

<i>Medium</i>	<i>Heating Value (MJ/Nm³)</i>
<i>Air</i>	4-7
<i>Steam</i>	10-18
<i>Oxygen</i>	12-28

(Sumber : Prabir Basu, 2013)

Gasifying agent yang menghasilkan heating value yang terbesar adalah Oxygen di ikuti dengan uap air dan terakhir udara. Udara menghasilkan heating value rendah karena udara mengandung 79 % nitrogen. Penelitian yang lain juga membuktikan bahwa nilai calorific value (CV) antara syn-gas hasil gasifikasi dengan menggunakan gasifying agent oksigen lebih besar dibandingkan dengan gasifying agent udara. (Pambudi, 2015)

Tabel 2.5 Perbandingan Komposisi Syn-Gas Antara Gasifying Udara Dan Oksigen Dengan Berbagai Bahan

Feedstock	Gasifying Agent	Syngas composition(% mole)						
		H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂	CV(MJ/kg)
Indian Coal	Air	8.8	41.8	0.623	0.018	17.3	32	12.59
	Oxygen	15.3	60.1	0.003	0.492	0.23	0.8	19.55
Rice Husk	Air	22.9	18.4	13.0	8.3	0.8	36.6	5.49
	Oxygen	36.5	21.8	20.2	19.9	0.6	0.4	9.14
Wood pellets	Air	32.1	29.8	7.9	5.7	0.9	23.6	9.22
	Oxygen	4.07	37.8	11.3	8.1	1.7	0.9	13.19

(Sumber : Raibhole & Sapali, 2012)

2.6 Co-Gasifikasi

Co-gasification merupakan suatu proses konversi bahan bakar padat konvensional dengan limbah biomassa yang mengandung unsur karbon menjadi gas dari dua material yang berbeda secara bersamaan agar emisi dari pembakaran suatu bahan bakar fosil dapat dikurangi.

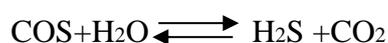
Co-gasification batubara dan biomassa menyebabkan menurunnya emisi CO₂ dan jumlah polutan NO_x dan SO_x dari bahan bakar fosil. Gasifikasi secara nyata mempunyai tingkat emisi udara, kotoran padat dan limbah terendah serta menghasilkan produk gas yang lebih baik (Primantara,2014)

2.7 Gas sintesa (*syngas*)

Syngas merupakan gas campuran yang komponen utamanya adalah gas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dan juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam proses pembuatan zat kimia baru seperti metana, amonia, dan urea.(Iswanto et al., 2015)

Syngas dari gasifier masih mengandung berbagai senyawa pengotor, seperti H₂S, COS, dan CO₂. Adanya senyawa- senyawa tersebut dapat meningkatkan risiko korosi pada peralatan dan merusak katalis, termasuk katalis dalam proses pembuatan pupuk. Oleh karena itu syngas perlu dimurnikan terlebih dahulu.

Karbonil sulfida bukan merupakan gas asam, maka hidrolisis COS untuk membentuk H₂S sering dilakukan untuk pemurnian sulfur yang terkandung dalam COS. Tujuan pengonversian COS menjadi H₂S disebabkan adsorben yang digunakan untuk proses desulfurisasi lebih selektif terhadap H₂S dari pada COS. Reaksi hidrolisis terjadi di COS hydrolysis reactor (R-310) dengan suhu operasi 303°C dan tekanan 29 bar dengan bantuan katalis chromia-alumina. (Iswanto et al., 2015)



Tabel 2.6 Target kualitas produk *syngas* berdasarkan komponen penyusun

Komponen	Konsentrasi (%mol)
CO	55,0
H ₂	40,0
CH ₄	3,0
CO ₂	0,05
N ₂	1,5
H ₂ O	0,45

(Sumber : Iswanto et al., 2015)

Tabel 2.7 Gas Hasil dari Gasifikasi Batubara

Produk	Karakteristik
<i>Low-Btu gas</i> (150-300 Btu/Scf)	Sekitar 50% N ₂ , dengan jumlah kecil H ₂ dan gas lain seperti metana
<i>Medium-Btu gas</i> (300-500 Btu/Scf)	Terutama CO dan H ₂ , dengan beberapa gas yang tidak mudah terbakar dan sedikit kandungan metana
<i>High-Btu Gas</i> (980-1080 Btu/Scf)	Hampir metana murni

(Sumber : Heiskanen, 2011 dalam Winarto, Agus, dkk. , 2016)

2.8 Pengaruh Ukuran Batubara dan Biomassa Terhadap Syngas

Semakin kecil ukuran batubara maka akan menyisakan lebih banyak air pada proses pembakaran dikarenakan batubara dengan ukuran partikel kecil memiliki volume rongga antar partikel yang lebih kecil dibandingkan batubara dengan ukuran partikel besar. Luas permukaan partikel tidak lagi menjadi efektif dibandingkan kecilnya volume rongga antar partikel yang mampu menghambat perpindahan massa air atau mengakibatkan air terperangkap dalam tumpukan batubara dan membuat proses pembakaran menjadi relatif lebih sempurna yang menyebabkan komposisi gas mampu bakar menurun. (Ismaily et al., 2021)

Selain itu ukuran batubara mempengaruhi kenaikan temperatur pembakaran. Batubara memiliki komponen penyusun yang mempengaruhi nilai kalor batubara tersebut. Salah satu faktor tersebut ialah kandungan air pada batubara atau *moisture content*. Batubara dengan ukuran partikel yang lebih kecil cenderung memiliki kadar air yang lebih banyak tersisa pada proses pembakaran. Pada reaksi pembakaran, air dalam batubara menghambat laju pemanasan batubara dan menghalangi kontak batubara dengan oksigen. (Handayani, 2017)

Dalam penelitian sebelumnya Biomassa berukuran lebih kecil maka suhu dalam selama pembakaran juga akan semakin naik karena semakin kecil cangkang akan memberikan ruang udara yang lebih sedikit. Ukuran kemiri yang lebih kecil menghasilkan kontak luas permukaannya

lebih besar maka pembakarannya menjadi lebih cepat dan sebanding dengan habisnya biomassa dalam gasifier lebih cepat. (Kurniawan & Susila, 2021)

2.9 Perhitungan Gasifikasi

Pada penelitian yang ditinjau melalui ukuran bahan baku terhadap komposisi *syngas* terdapat beberapa parameter yang perlu dipertimbangkan untuk menentukan hasil *syngas* seperti nilai *Fuel Consumption Rate* (FCR), *Air Fuel Ratio* (AFR), *Spesific Gasification Rate* (SGR), *Spesific Production Gasification Rate* (SPGR) yang mana ini bertujuan untuk mengetahui nilai *Power Output*.

2.9.1 *Fuel Consumption Rate* (FCR)

Jumlah dari bahan baku yang digunakan dalam pengoperasian di reaktor dibagi dengan waktu operasi. Dapat dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$FCR = \frac{\text{massa bahan bakar yang digunakan (kg)}}{\text{waktu operasi (jam)}}$$

(Sumber : Mokodompit. R. dkk, 2019)

2.9.2 *Air Fuel Rasio* (AFR) Aktual

Untuk menghitung AFR setiap satu kali operasi dengan waktu tertentu dapat menggunakan rumus :

$$\text{AFR aktual} = \frac{\rho \text{ oksigen } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times A \text{ pipa } (\text{m}^2) \times v \text{ oksigen } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{\text{Massa bahan bakar (kg) / waktu (s)}}$$

(Sumber : Suhendi, 2016)

2.9.3 *Spesific Gasification Rate* (SGR)

Nilai Rata-rata Gasifikasi Spesifik yang dihitung berdasarkan hubungan laju pemakaian bahan baku dan luas reaktor yang diformulasikan sebagai berikut :

$$\text{SGR} = \frac{\text{laju pemakaian bahan baku}}{\text{luas melintang reaktor}}$$

(Sumber : Kurniawan, 2012)

2.9.4 *Specific Production Gasification Rate (SPGR)*

Nilai rata-rata produksi gas spesifik ialah kecepatan produksi gas hasil pada setiap perluas melintang dari gasifier.

$$\text{SPGR} = \frac{\text{Laju alir syngas}}{\text{Luas melintang reaktor}}$$

(Sumber : Kurniawan, 2012)

2.9.5 *Power Output*

Jumlah energi yang dilepaskan selama pembakaran dalam reaktor

$$\text{Power Output} = \text{Gas Flowrate (kg/s)} \times \text{Heating Value Syngas}$$

(Sumber : Lubwama. M, pg. 15, 2010)