

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara merupakan sedimen organik bahan bakar hidrokarbon padat yang berasal dari proses pembusukan tumbuh-tumbuhan secara biokimia (penggambutan) dan geokimia (pembatubaraan) yang berlangsung pada kurun waktu yang sangat lama. Proses tersebut disebabkan oleh beberapa faktor yaitu tekanan yang berhubungan dengan kedalaman, dan suhu yang berhubungan dengan pengurangan kadar air dalam batubara. Batubara mengandung unsur-unsur karbon, hidrogen, dan oksigen sebagai komponen utamanya serta unsur sulfur (belerang) dan nitrogen sebagai komponen tambahan. Selain itu, batubara juga mengandung zat lain berupa senyawa anorganik pembentuk debu (*ash*). Zat ini menyebar sebagai partikel zat mineral yang terpisah di seluruh senyawa batubara.

Berikut jenis dan kualitas batubara menurut *American Society for Testing Materials* (ASTM) dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 ASTM Specifications For Solid Fuels

Class	Group		Fixed Carbon	Volatle Matter	Heating Values
	Name	Symbol	Dry (%)	Dry (%)	Dry basis (Kcal/kg)
Anthracite	Meta-anthracite	Ma	>98	>2	7740
	Anthracite	An	92-98	2-8	8000
	Semianthracite	Sa	86-92	8-15	8300
Bituminous	Low-volatile	Lvb	78-86	14-22	8741
	medium volatile	mvb	89-78	22-31	8640
	high-volatile A	hvAb	<69	>31	8160
	high-volatile B	hvBb	57	57	6750-8160
	high-volatile C	hvCb	54	54	7410-8375
Subbituminous	subbituminous A	subA	55	55	6880-7540
	subbituminous B	subB	56	56	6540-7230
	subbituminous C	subC	53	53	5990-6860
Lignite	lignite A	ligA	52	52	4830-6360
	lignite B	ligB	52	52	<5250

(Sumber: Krik-Othmer, Volume 6)

2.1.1 Klasifikasi Batubara

Setiap jenis batubara dipastikan memiliki kualitas dan karakteristik yang berbeda yang merujuk pada klasifikasinya. Kualitas dan karakteristik batubara ditentukan berdasarkan komposisi dan nilai kalori yang terkandung. Nilai kalori inilah yang berperan sebagai energi panas saat batubara digunakan. Untuk mengetahui komposisi dan karakter batubara perlu dilakukan pengujian kandungan batubara secara *proximate* dan *ultimate*. Analisa *proximate* berupa *moisture*, *volatile matter* dan *fixed carbon*. Sementara analisa *ultimate* berupa kandungan unsur karbon, hidrogen, nitrogen, belerang, dan oksigen. Analisa komposisi dan rentang komponen dari berbagai peringkat batubara dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Komposisi dan rentang komponen peringkat Batubara

Komponen	Anthracite	Bituminous	Subbituminous	Lignite
Moisture (%)	3-6	2-15	10-25	25-45
Volatile mater (%)	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
Heating Value (Btu/lb)	12,000-13,500	12,000-14,500	7500-10,000	6000-7500
Density (g/ml)	1.35-1.70	1.28-1.35	1.35-1.40	1.40-1.45

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

2.2 Ampas Tebu

Ampas tebu lazimnya disebut *bagasse* merupakan biomassa atau produk samping yang diperoleh dari proses ekstraksi (pemerahan) cairan tebu. Potensi penghasil limbah ampas tebu dominan berasal dari proses penggilingan pada pabrik gula. Dalam proses produksinya, tebu menghasilkan 90% ampas tebu, 5% molase dan 5% air (Li-An'Amie dkk, 2016). Limbah ampas tebu yang tidak dimanfaatkan dengan benar dapat menyebabkan masalah lingkungan dan menjadi keresahan dimasyarakat.

Biomassa seperti ampas tebu umumnya mengandung karbon, hidrogen dan oksigen. Berdasarkan jumlah dan kandungan yang terkandung pada ampas tebu maka pemanfaatannya sebagai sumber energi alternatif dinilai layak untuk dipertimbangkan. Limbah ampas tebu ini sudah dimanfaatkan sebagai alternatif bahan bakar, bahan pembuatan bubur kertas, pakan ternak maupun pupuk organik. Pabrik gula di Indonesia memanfaatkan ampas tebu (*bagasse*) sebagai bahan bakar bagi pabrik setelah ampas tebu tersebut mengalami pengeringan. Namun pemanfaatan ampas tebu sebagai bahan bakar pabrik tanpa pengolahan terlebih dahulu dinilai kurang efisien karena akan banyak menimbulkan emisi karbon.

2.2.1 Karakteristik Ampas Tebu

Untuk mengetahui karakteristik dan kandungan dari ampas tebu dapat dilakukan pemeriksaan secara analitis atau analisa *proximate* dan analisa *ultimate*. Komponen yang dapat diketahui pada analisa *proximate* berupa *Volatile matter*, *fixed carbon*, *ash*, dan *moisture*. Sementara pada analisa *ultimate* dapat diketahui unsur Karbon, Hidrogen, Oksigen, dan sebagian kecil unsur lainnya.

Kandungan yang dimiliki ampas tebu akan mempengaruhi proses dan produk yang dihasilkan. Berikut karakteristik dari komponen ampas tebu dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Komponen Ampas Tebu

	Komponen (%)	Komposisi (%)
Analisa	Volatile Matter	43,68
Proximate	Fixed Carbon	36,81
(wt%,db)	Ash	4,19
	Moisture	15,32
Analisa	C	24,12
Ultimate	H	3,12
(wt%,daf)	O	53,09
	N	0,12
	Cl	0,02
	S	0,04
HHV (db)		1830
(kkal/kg)		

(Sumber: S. Rizal dkk,2020)

Tabel 2.3 menjelaskan komponen yang terkandung didalam ampas tebu melalui analisa *proximate* dan *ultimate*. Untuk memperoleh unsur yang dibutuhkan yaitu C, H, O, N, Cl, S maka kandungan *moisture* dari ampas tebu harus dikeluarkan terlebih dahulu, *moisture* yang keluar akan membentuk molekul berupa H₂O. Pengeluaran volatil ampas tebu atau proses devolatilisasi menghasilkan unsur-unsur berupa C,H,O atau disebut juga *fixed carbon* dari ampas tebu yang bereaksi bersama udara media gasifikasi membentuk *syngas*, sedangkan *ash* terbentuk sebagai sisa dari proses. Kandungan unsur C dan H yang tinggi dapat menghasilkan nilai kalor gas yang cukup potensial untuk dimanfaatkan. Nilai kalor yang dimiliki ampas tebu yang cukup tinggi akan membantu pada proses gasifikasi. Dibandingkan dengan batubara, biomassa seperti ampas tebu mempunyai kadar volatile yang lebih tinggi, kadar karbon tetap yang lebih rendah, serta kadar abu yang lebih rendah. Pada pembakaran maupun gasifikasi, kadar abu dari biomassa juga tergolong lebih aman karena banyaknya mineral yang terkandung seperti fosfat dan potassium. Hal ini dapat membantu dalam upaya pengurangan emisi karbon yang menyebabkan masalah lingkungan.

2.3 Gasifikasi

Gasifikasi merupakan metode konversi secara termokimia bahan bakar padat menjadi bahan bakar gas berupa *syngas* dalam wadah yang disebut gasifier dengan menyuplai agen gasifikasi seperti uap panas, udara dan lainnya. Dalam prosesnya ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses gasifikasi yaitu waktu, kecepatan aliran udara, serta rasio udara dan bahan bakar (AFR). Proses gasifikasi berlangsung didalam gasifier, didalam gasifier ini akan terjadi proses pemanasan sampai temperatur reaksi tertentu dan selanjutnya bahan bakar padat yang digunakan akan bereaksi dengan oksigen melalui proses pembakaran untuk kemudian dihasilkan gas mampu bakar dan sisa hasil pembakaran lainnya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa proses gasifikasi merupakan proses parsial bahan baku padat yang melibatkan reaksi antara oksigen dengan bahan bakar padat.

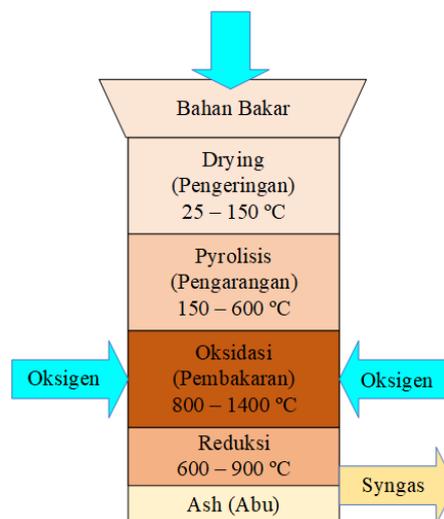
Dari semua teknologi konversi, gasifikasi telah dianggap sebagai pendekatan yang paling menjanjikan karena keunggulannya seperti kemampuan auto-termal, konversi karbon tinggi, nilai kalor yang lebih tinggi (daripada gas yang mudah terbakar yang berasal dari pirolisis) dari *syngas* (Raheem A dkk, 2019).

2.3.1 Gasifikasi Downdraft

Gasifikasi unggun tetap aliran kebawah atau sering disebut juga dengan gasifikasi tipe *downdraft* merupakan jenis gasifikasi yang dirancang untuk membatasi kandungan minyak dan tar yang terbawa bersama produk yang dihasilkan. Gasifikasi *downdraft* merupakan jenis gasifier yang memiliki arah aliran searah (*Co-current*). Pada tipe ini bahan bakar dan udara masuk dari bagian atas gasifier melalui laluan *hopper* dan mengalir turun ke *grate* yang merupakan tempat abu (Suliono dkk,2017). Gasifikasi tipe *Downdraft* dapat digunakan untuk *feedstock* berkadar air 25% dan temperatur tertingginya terjadi dibawah zona pembakaran. Pada gasifier tipe *downdraft* terdapat empat zona diurut dari bagian atas gasifier hingga bawah yaitu pengeringan, pyrolisis, oksidasi, dan reduksi.

Aliran udara bergerak ke zona gasifikasi yang menyebabkan asap pirolisis melewati zona gasifikasi yang panas. Hal ini membuat tar yang terkandung dalam asap terbakar, sehingga gas yang dihasilkan oleh reaktor ini lebih bersih. Keuntungan reaktor tipe ini adalah dapat digunakan untuk operasi yang berkesinambungan dengan menambahkan bahan bakar melalui bagian atas reaktor. Namun untuk operasi yang berkesinambungan dibutuhkan sistem pengeluaran abu yang baik, agar bahan bakar bisa terus ditambahkan kedalam reaktor.

Gambaran tahap-tahap yang terjadi pada *downdraft gasifier* dapat dilihat pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Gasifier tipe *Downdraft*

Adapun kelebihan dan kelemahan daripada proses gasifikasi tipe *downdraft* adalah sebagai berikut :

Tabel 2.4 Kelebihan dan kelemahan gasifikasi tipe *downdraft*

Kelebihan	Kelemahan
- Dapat beroperasi secara kontinyu dengan suhu gas tinggi.	- Desain gasifier tinggi.
- Kandungan tar dan abu dalam output sangat kecil.	- Tidak cocok untuk beberapa jenis biomassa.

2.3.2 Tahapan Gasifikasi

Karakterisasi tahapan proses dan suhu proses gasifikasi menggunakan reaktor *downdraft* adalah sebagai berikut :

1. *Drying* (Pengeringan)

Pada tahap ini kandungan air pada bahan bakar akan diuapkan oleh gas panas dari reaksi oksidasi pembakaran pada bagian bawah reaktor, temperatur yang digunakan berkisar pada suhu 25 - 150 °C. Reaksi yang terjadi proses pengeringan adalah :



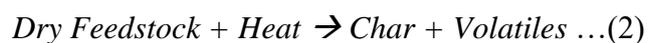
2. *Pirolisis* (Pengarangan)

Pirolisis merupakan proses dekomposisi thermal bahan bakar padat pada kondisi udara terbatas. Pada tahap ini terjadi perengkahan termal bahan bakar padat menjadi menjadi senyawa-senyawa seperti CH₄, CO, H₂, CO₂, dan H₂O yang berarti volatil yang terkandung pada bahan bakar terlepas dan menghasilkan char (arang). Komponen gas yang terbentuk pada tahap ini akan menjadi reaktan pada proses oksidasi. Laju reaksi pirolisis dipengaruhi oleh laju persamaan bahan di dalam zona pirolisis. Laju pemanasan bahan bakar tergantung pada sifat termofisik bahan yang dinyatakan sebagai difusitas hawa panas yang terjadi karena nyala api (bahang) bahan bakar. Laju pemanasan bahan bakar akan semakin tinggi seiring dengan semakin

besarnya difusivitas bahang dan menyebabkan bertambahnya laju pirolisis sehingga laju pembentukan gas akan semakin tinggi.

Pada proses pirolisis, biomassa mulai mengalami kenaikan temperatur. Pada Pemanasan secara lambat dimulai pada temperatur <200 °C hanya akan uap air saja yang dilepaskan. Pada temperatur 280-500 °C uap air dan asam asetat yang terkandung akan dilepaskan, lalu pada temperatur 280-500 °C akan dihasilkan gas dalam jumlah yang cukup besar. Terakhir pada temperatur 500-700 °C akan dihasilkan gas yang mengandung hidrogen namun dalam jumlah yang lebih sedikit.

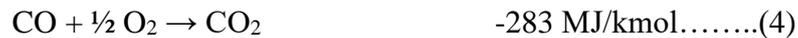
Tahap Pirolisis yang terjadi pada molekul bahan bakar akan menyebabkan pemanasan terhadap partikel bahan bakar padat akan menyebabkan pemutusan ikatan kimia dan ikatan paling lemah diikuti dengan ikatan yang lebih kuat, dimana akan terjadi 3 tahapan lagi setelahnya. Tahap pertama ikatan hidrogen terputus dan bahan bakar padat akan lebih lembut atau melembek (*metaplast*). Tahap kedua (*Primary Pyrolysis*), ikatan kimia pada rantai alifatis mulai terputus sehingga dapat membentuk molekul dengan berat molekul besar, metana, CO₂, uap air, hidrokarbon ringan serta gas molekul ringan yang lain. Ketika molekul besar yang mengalami perengkahan memiliki jumlah molekul yang cukup ringan maka akan terjadi penguapan pada suhu pirolisis sehingga pada suhu yang lebih rendah akan mengembun dan membentuk tar. Terbentuknya tar ditentukan oleh ikatan rantai silang dan reaktifitas arang yang terbentuk pada tahapan berikutnya. Lalu pada tahapan yang ketiga (*Secondary pyrolysis*) akan terjadi pemutusan ikatan kimia dan gugusan fungsi metilen sehingga membentuk gas CH₄, gugus fungsi eter akan membentuk CO dan proses kondensasi akan melepas gas H. Pada tahapan yang ketiga ini juga terjadi proses polimerisasi molekul besar membentuk karbon padat. Reaksi yang terjadi pada proses pengarangan adalah sebagai berikut :



3. Oksidasi (Pembakaran)

Proses oksidasi terjadi setelah proses pirolisis. Volatil dan sebagian arang yang memiliki kandungan karbon (C) bereaksi dengan oksigen membentuk

CO dan CO₂ sehingga menghasilkan gas mampu bakar yang sempurna dengan timbulnya energi panas. Temperatur yang digunakan pada proses ini berkisar pada temperatur 800 – 1400 °C. Reaksi yang terjadi pada proses pembakaran adalah sebagai berikut :



4. Reduksi

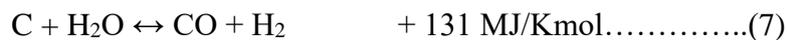
Reduksi merupakan tahapan untuk mendapatkan *syngas*. Proses reduksi adalah reaksi penyerapan panas (endoterm), yang menggunakan panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Produk yang dihasilkan dari tahapan reduksi adalah gas mampu bakar seperti H₂, CO, dan CH₄. Temperatur yang digunakan pada proses ini berkisar pada temperatur 600 – 900 °C. Reaksi berikut ini merupakan empat reaksi yang umum terlibat pada gasifikasi:

- *Boudouard Reaction*



Reaksi antara karbondioksida yang terdapat pada gasifier dengan karbon untuk menghasilkan karbonmonoksida.

- *Water gas Reaction*



Reaksi oksidasi parsial karbon oleh yang dapat berasal dari bahan bakar padat (hasil pirolisis) maupun dari uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air.

- *Methanation Reaction*



Reaksi pembentukan gas metan.

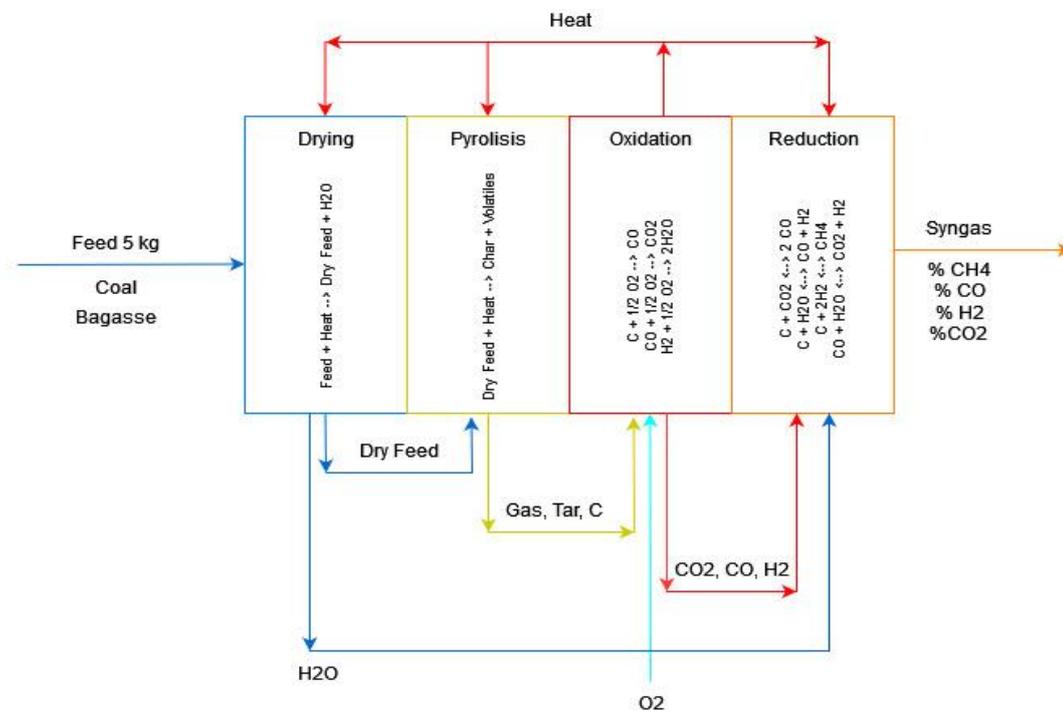
- *CO Shift Reaction*



Reaksi reduksi karbonmonoksida untuk memproduksi hidrogen. Reaksi ini disebut dengan *water-gas shift* yang menghasilkan peningkatan rasio hidrogen terhadap karbonmonoksida pada gas produser.

Pada tahap reduksi, berlangsung reaksi-reaksi antara gas hasil tahap oksidasi dengan karbon padat yang diumpankan sebagai arang. Reaksi kesetimbangan yang terjadi merupakan reaksi endoterm atau reaksi yang menyerap panas. Hawa panas yang terjadi karena nyala api dipenuhi dari proses oksidasi.

Berikut Diagram Proses pada Gasifikasi *Downdraft* dapat dilihat pada **Gambar 2.2.**



Gambar 2.2. Diagram Proses Gasifikasi *Downdraft*

2.4 Gasifying Agent

Penelitian oleh (Adnan M.A dkk, 2018) juga meneliti berbagai parameter lain antara lain, tekanan gasifikasi, sifat umpan, agen gasifikasi, dan desain gasifier pada kinerja gasifikasi dari umpan campuran. Studi tersebut menunjukkan bahwa agen gasifikasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap komposisi syngas untuk mendapatkan kualitas *syngas* yang unggul.

Komposisi *syngas* yang dihasilkan cenderung bergantung pada *gasifying agent* yang digunakan. Untuk proses kontrol biasanya yang menentukan performa dari proses gasifikasi adalah volume dari reaktor tersebut dan laju aliran massa agen gasifikasi yang digunakan. *Gasifying agent* merupakan bahan agen untuk proses terjadinya reaksi kimia sehingga bahan bakar padat terkonversi menjadi gas yang mudah terbakar. Pemilihan *gasifying agent* sangat penting karena tergantung pada jenis reaktor serta investasi biaya yang dibutuhkan. Pada proses gasifikasi dapat menggunakan *gasifying agent* tunggal maupun campuran, yang paling sering digunakan adalah udara, oksigen (O₂), karbon dioksida (CO₂), dan uap. Penggunaan udara sebagai *gasifying agent* banyak digunakan karena cukup dengan suplay udara dari blower sehingga lebih murah daripada *gasifying agent* lainnya. Penggunaan *gasifying agent* dan suhu yang berbeda dapat mempengaruhi komposisi gas yang dihasilkan. *Gasifying agent* berdampak pada kualitas dan kuantitas *syngas*. Ada empat agen gasifikasi umum digunakan yaitu udara, uap, oksigen dan campuran udara-uap. Penggunaan agen gasifikasi dapat mempengaruhi komposisi gas, kandungan tar, dan *heating value*.

Tabel 2.5 Karakteristik *Syngas* berdasarkan *gasifying agent*

<i>Gasifying Agent</i>	T (°C)	Komposisi Gas			Yields	
		<i>(dry basis)</i>			Gas (Nm ³ /kg)	LHV (MJ/Nm ³)
		H ₂ (%)	CO (%)	Tar (g/kg)		
Udara	780-830	5,0-16,3	9,9-22,4	3,7-61,9	1,25-2,45	3,7-8,4
O ₂ + uap	785-830	13,8-31,7	42,5-52,0	2,2-46	0,85-1,14	10,3-13,5
Uap	750-780	38-56	17-32	60-95	1,3-1,6	12,2-13,8

(Sumber: Suliono dkk,2017)

Umumnya proses gasifikasi menggunakan udara sebagai *gasifying agent*nya, namun gas yang dihasilkan seringkali tidak bagus jika menggunakan oksigen murni, karena dalam udara terdapat zat lain yang tidak diperlukan dalam proses pembakaran contohnya kandungan nitrogen.

2.5 Co-Gasifikasi

Co-Gasifikasi merupakan kombinasi bahan bakar padat konvensional dengan bahan bakar padat yang mengandung unsur karbon dalam proses gasifikasi. Co-gasifikasi adalah istilah yang mengacu pada proses gasifikasi di mana dua bahan bakar yang berbeda digasifikasi secara bersamaan dalam gasifier yang sama (Umar H.A dkk, 2020). Co-Gasifikasi (pencampuran) dua bahan bakar atau lebih menggunakan biomassa dengan batubara dapat meningkatkan nilai kalor selama proses konversi energi dan juga dapat mengendalikan kandungan Volatile Matter (VM) dari biomassa. Karakteristik Co-gasifikasi biomassa dan batubara berkaitan erat dengan jenis reaktor dan parameter gasifikasi seperti suhu, agen gasifikasi, rasio massa, ukuran butir, dan lain-lain (Chang S dkk, 2020).

2.6 Gas Sintesa (Syngas)

Gas sintetik (*Syngas*) atau gas mampu bakar merupakan campuran Hidrogen dan Karbon Monoksida yang dihasilkan pada proses gasifikasi. Makna dari sintetik gas merupakan pengganti gas alam dalam hal ini terbuat dari gas metana. *Syngas* adalah bahan baku yang penting bagi industri kimia dan industri pembangkit. *Syngas* dari gasifier masih mengandung berbagai senyawa pengotor, seperti H₂S, COS, dan CO₂. Senyawa-senyawa tersebut dapat meningkatkan kemungkinan korosi pada peralatan. Oleh karena itu *Syngas* yang dihasilkan harus dimurnikan terlebih dahulu. Berikut tinjauan kualitas syngas berdasarkan jenis gasifier dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2.6 Kualitas Gas Produser dari Gasifier Biomassa

% Volume	<i>Fixed bed Co- Current Gasifier</i>	<i>Fixed Bed Counter-current Gasifier</i>	<i>Circulating Fixed Bed Gasifier</i>
CH ₄	1-5	2-3	2-4
CO	10-22	15-20	13-15
H ₂	15-21	10-14	15-22

(Sumber : Khoirusman, 2008 dalam Setyoko G 2016)

2.7 Pengaruh Rasio Komposisi Bahan Bakar

Rasio Komposisi bahan bakar merupakan peranan penting terhadap produk *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi. Nilai kalor biomassa yang lebih rendah menyebabkan komposisi biomassa biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan komposisi batubara pada proses co-gasifikasi.

Pada penelitian sebelumnya oleh (Wijaya I K dkk, 2017) yang berjudul “Pengaruh Komposisi Biomassa dan Batubara Terhadap Performansi Co-Gasifikasi Sirkulasi Fluidized Bed” disimpulkan bahwa pada variasi komposisi campuran bahan bakar 70% serbuk kayu : 30% batubara terjadi peningkatan kandungan gas mampu bakar (CO) dan penurunan hasil gas CO₂ dibandingkan dengan bahan bakar dengan komposisi campuran 50% serbuk kayu : 50% batubara. Namun pada penelitian tersebut digunakan biomassa yang bernilai kalor lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kalor batubara.