

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa adalah campuran material organik yang kompleks, biasanya terdiri dari karbohidrat, lemak, protein dan beberapa mineral lain yang jumlahnya sedikit seperti sodium, fosfor, kalsium dan besi. Komponen utama tanaman biomassa adalah karbohidrat (berat kering kira-kira 75%), lignin (sampai dengan 25%) dimana dalam beberapa tanaman komposisinya bisa berbeda-beda. Keuntungan penggunaan biomassa untuk sumber bahan bakar adalah keberlanjutannya, diperkirakan 140 juta ton matrik biomassa digunakan pertahunnya. Keterbatasan dari biomassa adalah banyaknya kendala dalam penggunaan untuk bahan bakar kendaraan bermobil.

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 (Hendrisson, 2003).

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 (Agustina, 2004).

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.

Energi biomassa dapat menjadi sumber energi alternatif pengganti bahan bakar fosil, karena beberapa sifatnya yang menguntungkan yaitu, dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*), relatif tidak mengandung unsur sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara dan juga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian.

2.1.2 Kayu

Salah satu alternatif yang dapat dilakukan dalam menggantikan bahan bakar fosil adalah dengan mengkonversikan biomassa menjadi gas yaitu dengan cara gasifikasi. Sebagai contoh bahan yang dapat digunakan adalah limbah kayu. Limbah kayu, mudah diperoleh dan dapat terbarukan. Bahan ini juga banyak terdapat di Indonesia sebagai negara yang kaya akan kayu hutan.

2.1.3 Komposisi Kayu

Pada tabel *proximate* dan *ultimate analysis* kandungan utama yang terdapat pada serbuk kayu adalah karbon, oksigen, dan hidrogen. Pada tabel *proximate* dan *ultimate analysis* memperlihatkan komposisi dari kayu.

Tabel 1. Analisis Proksimat, Ultimat dan Nilai Kalordari Serbuk Kayu

Parameter	Nilai
Analisa Proksimat	
<i>Moisture</i> (%)	8,69
<i>Volatile Matter</i> (%)	77,33
<i>Ash</i> (%)	2,28
<i>Fixed Carbon</i> (%)	11,7
Analisa Ultimat	
<i>Carbon</i> (C) (%)	43,01
<i>Hydrogen</i> (H) (%)	6,42
<i>Oxygen</i> (O) (%)	39,6

Nitrogen (N) (%)	0,17
Sulphur (S) (%)	0,02
Nilai Kalor Bahan Baku	
Low Heating Value (MJ/Kg)	14,88

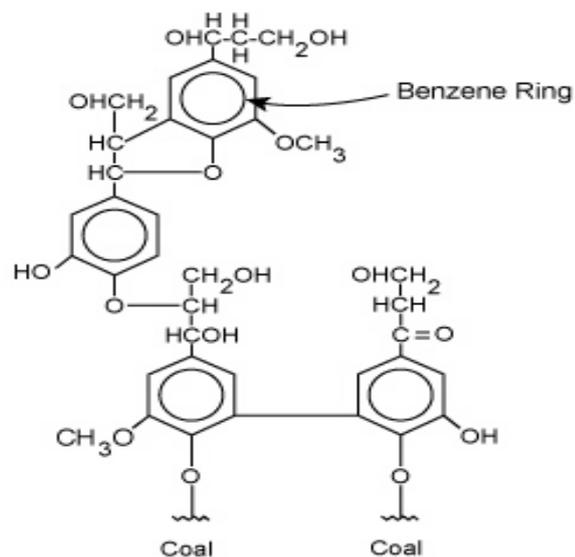
Sumber : Jurnal Experimental Study on Sawdust Air Gasification in An Entrained-Flow Reactor-Yijun Zhao dkk, dan LHV diuji di Lab. PSE ITS oleh Ferry Ardianto

2.2 Batubara

2.2.1 Sebagai bahan bakar

Batubara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan terbentuk melalui proses pembatubaraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hydrogen dan oksigen.

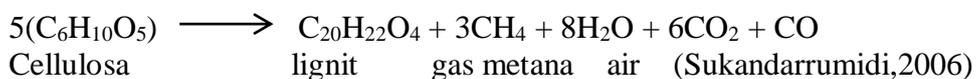
Batu bara juga adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisis unsur memberikan rumus formula empiris seperti $C_{137}H_{97}O_9NS$ untuk bituminus dan $C_{240}H_{90}O_4NS$ untuk antrasit.



Gambar 1. Rumus bangun batubara

Sumber:(USGS, 2012)

Reaksi pembentukan batubara dapat diperlihatkan sebagai berikut :



2.2.2 Kelas dan Jenis-jenis Batubara

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas dan waktu, batubara umumnya dibagi dalam lima kelas: antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

- a. Antrasit adalah kelas batu bara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (luster) metalik, mengandung antara 86% - 98% unsur Karbon (C) dengan kadar air kurang dari 8%.
- b. Bituminous mengandung 68 - 86% unsur Karbon (C) dan berkadar air 8-10% dari beratnya. Kelas batu bara yang paling banyak ditambang di Indonesia, tersebar di pulau sumatera, kalimantan dan sulawesi.
- c. Sub-bituminus mengandung sedikit Karbon dan banyak air, dan oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan bituminus.
- d. Lignit atau batu bara coklat adalah batu bara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya.
- e. Gambut, berpori dan memiliki kadar air di atas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.

2.2.3 Kualitas Batubara

Batubara yang diperoleh dari penambangan pasti mengandung pengotor (*impurities*). Penambangan dalam jumlah besar selalu menggunakan alat-alat berat seperti *bulldoser, backhole, tractor*, dan lainnya.

- *Impurities* terbagi menjadi dua jenis yaitu :

1. *Inherent Impurities*

Merupakan pengotor bawaan yang terdapat pada batubara. Batubara yang sudah dicuci (*washing*) yang di kecilkan ukuran butirannya (*crushing*) kemudian dibakar dan menyisakan abu. Pengotor ini merupakan pengotor bawaan pada saat pembentukan batubara, pengotor tersebut dapat berupa gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (CaSO_4), pirit (FeS_2), silika (SiO_2) dapat pula berbentuk tulang-tulang binatang (diketahui dari senyawa-senyawa fosfor dari analisis abu). Pengotor bawaan ini tidak mungkin dihilangkan sama sekali, tetapi dapat dikurangi dengan cara pembersihan. Proses ini dikenal dengan teknologi batubara bersih.

2. *External impurities*

Merupakan pengotor yang berasal dari luar , timbul pada saat proses penambangan. Dalam menentukan mutu atau kualitas batubara perlu diperhatikan beberapa hal :

a. *Calorific Value* / Nilai kalor

Dinyatakan dengan kkal/Kg, banyaknya jumlah kalori yang dihasilkan batubara tiap satuan berat (dalam kilogram).

b. *Moisture Content* (kandungan lengas / air)

Batubara dengan jumlah lengas tinggi akan memerlukan lebih banyak udara primer untuk mengeringkan batubara tersebut agar suhu batubara pada saat keluar dari gilingan tetap, sehingga hasilnya memiliki kualitas yang terjamin. Jenis air sulit untuk dilepaskan tetapi dapat dikurangi, dengan cara memperkecil ukuran butir batubara (Wahyudiono,2006).

c. *Ash Content* (Kandungan abu)

Komposisi batubara bersifat heterogen ,apabila batubara dibakar maka senyawa organik yang ada akan di ubah menjadi senyawa oksida yang berukuran butiran dalam bentuk abu. Abu dari sisa pembakaran inilah yang dikenal sebagai *ash content*. Abu ini merupakan kumpulan dari bahan – bahan pembentuk batubara yang tidak dapat terbakar, atau yang di oksidasi oleh oksigen . Bahan sisa dalam bentuk padatan ini antara lain senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Mn_3O_4 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , P_2O , SO_3 dan oksida unsur lainnya.

d. *Sulfur Content* (kandungan belerang)

Belerang yang terdapat pada batubara dalam bentuk senyawa organik dan anorganik, dalam senyawa anorganik dapat dijumpai dalam bentuk mineral pirit (FeS_2 bentuk kristal kubus) , markasit (FeS_2 bentuk kristal orthorombik) atau dalam bentuk sulfat. Sedangkan belerang organik terbentuk selama terjadinya proses coalification .

- e. *Volatile matter* (bahan mudah menguap)
Kandungan *Volatile matter* mempengaruhi kesempurnaan pembakaran dan intensitas nyala api.
- f. *Fixed Carbon*
Didefinisikan sebagai material yang tersisa , setelah berkurangnya *moisture* , *volatile matter* dan *ash*. Hubungan ketiganya sebagai berikut:
$$\text{Fixed Carbon (\%)} = 100\% - \text{Moisture Content} - \text{Ash Content}$$
$$\text{Fixed Carbon} = 100 - \text{Volatile Matter (\%)}$$
- g. *Hardgrove Grindability Index* (HGI)
Suatu bilangan yang menunjukkan mudah atau sukarnya batubara di giling atau di gerus menjadi bentuk serbuk. Butiran paling halus < 3 mm sedangkan yang paling kasar sampai 50 mm.
- h. *Ash Fusion Character of coal*
Kualitas batubara adalah sifat fisika dan kimia dari batubara yang mempengaruhi potensi kegunaannya. Kualitas batubara ditentukan oleh maseral dan mineral matter penyusunnya, serta oleh derajat *coalification* (rank).

Tabel 2. Nilai Kalor dari Kelas-Kelas Batubara

No	Jenis Batubara	Nilai Kalor kcal/kg
1	Lignite	2012-5230
2	Bituminus Coal	5671
3	Antracite	7183-76

(Sumber :Hendra Yudi Saputra, 2015)

2.2.4 Emisi pembakaran batubara

Polutan-polutan penting yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara antara lain adalah SO₂, NO_x, CO, dan material partikulat. Selain itu ada bahan

polutan lain yang disebut udara beracun. Ia adalah polutan yang sangat berbahaya meskipun jumlahnya hanya sedikit dihasilkan oleh pembakaran batubara.

1. Sulfur Dioksida (SO_2)

Batubara memiliki kandungan sulfur yang dapat mencapai 10% dalam fraksi berat. Namun rata-rata kandungan sulfur di dalam batubara berada di kisaran 1-4% tergantung dari jenis batubara tersebut. Proses pembakaran batubara menyebabkan sulfur tersebut terbakar dan menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2) dan sebagian kecil menjadi sulfur trioksida (SO_3).

Secara langsung, sulfur oksida dapat menyebabkan iritasi pada alat pernapasan manusia, mengurangi jarak pandang kita, sekresi mukus berlebihan, sesak napas, dan lebih lanjut dapat menyebabkan kematian. Reaksi sulfur oksida dengan kelembaban ataupun hujan, dapat menimbulkan hujan asam yang sangat berbahaya bagi tanaman, hewan terutama hewan air, serta sifatnya yang korosif dapat merusak infrastruktur-infrastruktur yang ada.

2. Sulfur Trioksida(SO_3)

Sebagian kecil sulfur dioksida yang terbentuk pada pembakaran batubara, terkonversi menjadi sulfur trioksida (SO_3). Rata-rata SO_3 terbentuk sebanyak 1% dari total gas buang pembakaran. Satu sistem pada boiler yang berfungsi untuk mengontrol gas buang NO_x , memiliki efek samping meningkatkan pembentukan SO_3 dari 0,5% sampai 2%. SO_3 sangat mudah bereaksi dengan air untuk membentuk asam sulfat (H_2SO_4) pada temperatur gas buang di bawah 260°C . Seperti yang Anda ketahui bahwa asam sulfat bersifat amat sangat korosif dan berbahaya.

SO_3 memiliki sifat higroskopis yang sangat agresif. Higroskopis adalah sebuah sifat untuk menyerap kelembaban dari lingkungan sekitarnya. Sebagai gambaran untuk Anda, SO_3 yang mengenai kayu ataupun bahan katun dapat menyebabkan api seketika itu juga. Kasus ini terjadi karena SO_3 mendehidrasikan karbohidrat yang ada pada benda-benda tersebut. Polutan ini juga sangat jelas berbahaya bagi manusia, karena apabila terkena kulit, kulit tersebut akan seketika mengalami luka bakar yang serius. Atas dasar inilah

polutan SO_3 harus ditangani dengan sangat serius agar tidak mencemari lingkungan sekitar.

3. Nitrogen Oksida(NO_x)

Nitrogen Oksida yang dihasilkan oleh pembakaran batubara biasa disebut dengan NO_x . NO_x meliputi semua jenis senyawa yang tersusun atas atom nitrogen dan oksigen. Nitrat oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_x) menjadi penyusun utama dari polutan ini. NO, yang paling banyak jumlahnya, terbentuk pada pembakaran bertemperatur tinggi hingga dapat mereaksikan nitrogen yang terkandung pada bahan bakar dan/atau udara, dengan oksigen. Jumlah dari NO_x yang terbentuk tergantung atas jumlah dari nitrogen dan oksigen yang tersedia, temperatur pembakaran, intensitas pencampuran, serta waktu reaksinya.

Bahaya polutan NO_x yang paling besar berasal dari NO_2 , yang terbentuk dari reaksi NO dengan oksigen. Gas NO_2 dapat menyerap spektrum cahaya sehingga dapat mengurangi jarak pandang manusia. Selain itu NO_x dapat mengakibatkan hujan asam, gangguan pernapasan manusia, korosi pada material, pembentukan *smog* dan kerusakan tumbuhan.

4. Karbon Monoksida(CO)

Gas yang tidak berwarna dan juga tidak berbau ini terbentuk dari proses pembakaran yang tidak sempurna. Karbon monoksida (CO) dihasilkan dari proses pembakaran batubara di boiler dalam jumlah yang relatif sangat kecil. Bahaya paling besar yang diakibatkan oleh CO adalah pada kesehatan manusia dan juga hewan. Jika gas CO terhirup, ia akan lebih mudah terikat oleh hemoglobin darah daripada oksigen. Hal ini menyebabkan tubuh akan kekurangan gas O_2 , dan jika jumlah CO terlalu banyak akan dapat menyebabkan penurunan kemampuan motorik tubuh, kondisi psikologis menjadi stress, dan paling parah adalah kematian.

5. Abu(*FlyAsh*)

Hasil pembakaran batubara di boiler juga menghasilkan partikel-partikel

abu dengan ukuran antara 1 hingga 100 μm . Abu tersebut mudah terlihat oleh mata kita, bahkan dapat mengganggu jarak pandang jika tersebar di udara bebas. Selain itu *fly ash* sangat berbahaya jika sampai terhirup oleh manusia, karena ia dapat melukai bagian-bagian penting sistem pernapasan. *Fly ash* tersusun atas beberapa senyawa padat, diantaranya adalah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dan CaO . Di samping itu, *fly ash* juga mengandung logam-logam berat dan partikel-partikel lain yang sangat beracun bagi manusia jika berada dalam jumlah yang cukup. Racun-racun tersebut berasal dari batubara, diantaranya adalah arsenik, berilium, cadmium, barium, chromium, tembaga, timbal, mercury, molybdenum, nikel, radium, selenium, thorium, uranium, vanadium, dan seng.

Komposisi antara abu terbang dan abu dasar tergantung sistem pembakarannya. Dalam tungku pulverized coal sistem basah antara 45-55 %, dan tungku underfeed stoker 30-80 % dari total abu batubara. Abu terbang ditangkap dengan Electric Precipitator sebelum dibuang ke udara melalui cerobong.

6. Karbon dioksida(CO_2)

Dalam pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, tujuan utamanya adalah semaksimal mungkin mengkonversikan unsur utama dalam batubara yakni C (karbon) menjadi CO_2 sehingga dihasilkan energi yang tinggi. Dikarenakan batubara mengandung kadar karbon paling tinggi dibanding bahan bakar fosil lainnya seperti minyak dan gas, maka pembakaran batubara dianggap merupakan sumber emisi CO_2 terbesar. (Onny, 2015)

2.3 Jerami

Menurut Komar (1984) yang dikutip oleh Suryani (1994) mengatakan bahwa jerami padi adalah bagian batang tumbuh yang telah dipanen bulir-bulir buah bersama atau tidak dengan tangkainya dikurangi dengan akar dan bagian batang yang tertinggal. Jerami adalah hasil samping usaha pertanian berupa tangkai dan batang tanaman sereal yang telah kering, setelah biji-bijiannya dipisahkan. Massa jerami kurang lebih setara dengan massa biji-bijian yang dipanen. Jerami memiliki banyak fungsi, di antaranya sebagai bahan bakar, pakan ternak, alas atau

lantai kandang, pengemas bahan pertanian (misal telur), bahan bangunan (atap, dinding, lantai), mulsa, dan kerajinan tangan. Jerami umumnya dikumpulkan dalam bentuk gulungan, diikat, maupun ditekan. Mesin baler dapat membentuk jerami menjadi gulungan maupun kotak. Biomassa dari jerami telah dimanfaatkan dalam skala besar di Uni Eropa sebagai bahan pembangkit listrik. Jerami juga telah digunakan sebagai bahan bakar pendamping (*co-firing*) pada ketel uap batu bara. Namun kadar air jerami perlu dikurangi sebelum dilakukan pembakaran, karena sebagai material biologis, jerami mampu menyerap air dari lingkungan. Kadar air yang tinggi mengurangi nilai kalor dari jerami.

2.4 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). Komposisi *Syngas* hasil gasifikasi bahan bakar padat yaitu CO 20% Vol, CO_2 10% Vol, CH_4 2% Vol, H_2 15% Vol, N_2 53% Vol (Perrys Ch, 2008). 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. 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.

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 °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: $T < 150$ °C
- Pirolisis/Devolatilisasi: $150 < T < 700$ °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.

Tabel 3. Perbandingan Teknologi Gasifikasi dan Pembakaran

Perbedaan	Gasifikasi	Pembakaran
Tujuan	Meningkatkan nilai tambah dan kegunaan dari sampah atau material dengan nilai rendah.	Membangkitkan panas atau mendestruksi sampah
Jenis proses	Konversi kimia dan termal menggunakan sedikit oksigen atau tanpa oksigen	Pembakaran sempurna menggunakan udara berlebih (oksigen)
Komposisi gas kotor sebelum dibersihkan	H ₂ , CO, H ₂ S, NH ₃ dan partikulat	CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , NO _x dan partikulat
Komposisi gas bersih	H ₂ dan CO	CO ₂ dan H ₂ O
Produk padatan	Arang atau kerak (slag)	Abu

Temperatur (°C)	700-1500	800-1000
Tekanan	Lebih dari 1 atm	1 atm

Sumber: <http://id.wikipedia.org/wiki/Gasifikasi> (2013)

2.5 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 kurang tepat. 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 energi

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 $\text{CH}_{1.2}\text{O}_{0.5}$, 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 g/m^3 .

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

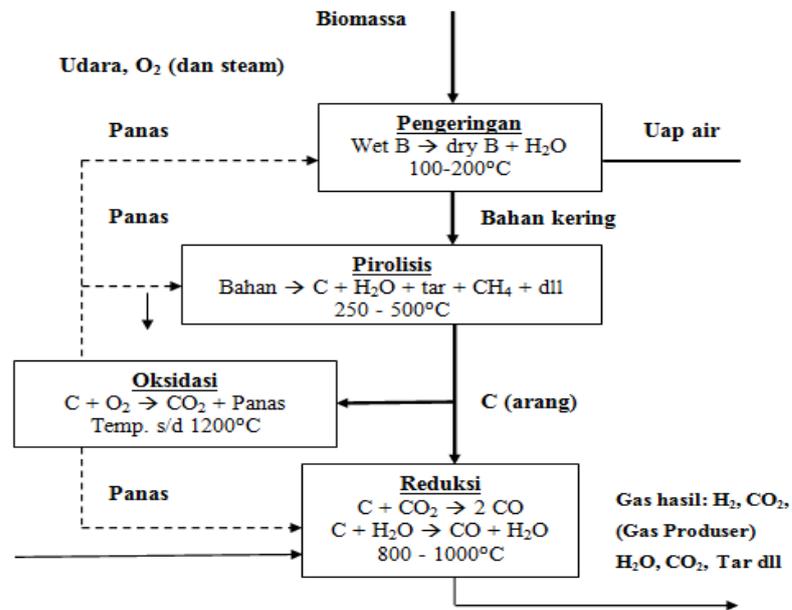
kandungan nitrogen pada *syngas* dan mempengaruhi besar nilai kalor yang dikandungnya. Penggunaan udara bebas menghasilkan senyawa nitrogen yang pekat di dalam *syngas*, berlawanan dengan penggunaan oksigen/uap yang memiliki kandungan nitrogen yang relatif sedikit. Sehingga penggunaan *gasifying agent* 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.

2.6 Tahapan Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi terdiri dari empat tahapan proses atas dasar perbedaan rentang kondisi temperatur, yaitu pengeringan ($T > 150^{\circ}\text{C}$), pirolisis ($150 < T < 700^{\circ}\text{C}$), oksidasi ($700 < T < 1500^{\circ}\text{C}$), dan reduksi ($800 < T < 1000^{\circ}\text{C}$). 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, H_2 dan CO (Pranolo, 2010).



Gambar 2. Tahapan Proses Gasifikasi

Sumber : Witoyo, J.E

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 pirolisi 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.

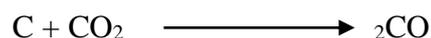
Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Proses pirolisis pada bahan bakar terbentuk pada temperatur antara 150°C sampai 700°C di dalam reaktor. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa arang atau karbon, tar, gas (CO₂, 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 *Bourdouar reaction*, *steam-carbon reaction*, *water-gas shift reaction*, dan *CO methanation*.

Proses reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

Bourdouar reaction :



Steam-carbon reaction :



Water-gas shift reaction:



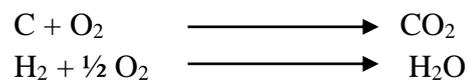
CO methanation :



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 mudahterbakar 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 :



2.7 Jenis Reaktor

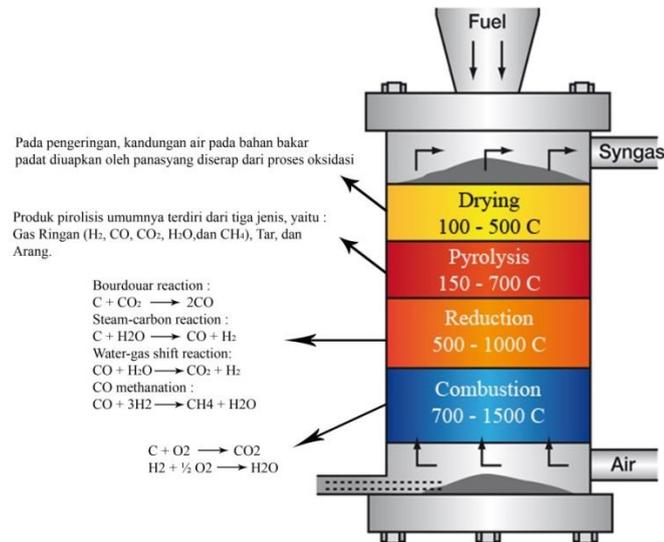
Berdasarkan mode fluidisasinya, gasifier dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: mode gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*), mode gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), mode gasifikasi *entrained flow*. Sampai saat ini yang digunakan untuk skala proses gasifikasi skala 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). 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.

a. Updraft Gasifier

Updraft Gasifier merupakan reaktor gasifikasi yang umum digunakan secara luas. Ciri khas dari reaktor gasifikasi ini adalah aliran udara dari blower masuk

melalui bagian bawah reaktor melalui grate sedangkan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas reaktor sehingga arah aliran udara dan bahan bakar memiliki prinsip yang berlawanan (*counter current*). Produksi gas dikeluarkan melalui bagian atas dari reaktor sedangkan abu pembakaran jatuh ke bagian bawah gasifier karena pengaruh gaya gravitasi dan berat jenis abu.



Gambar 3. Updraft Gasifier

Sumber : <http://engin1000.pbworks.com> (2011)

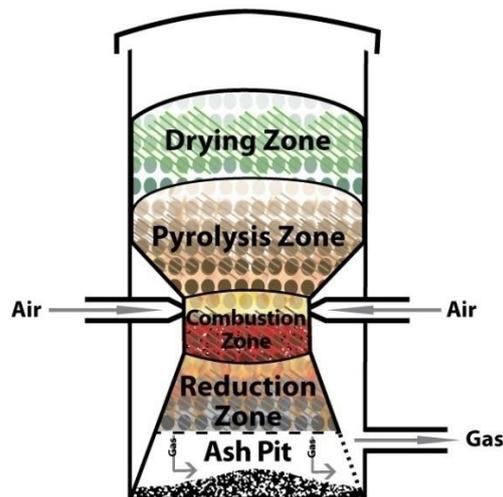
Di dalam reaktor, terjadi zonafikasi area pembakaran berdasarkan pada distribusi temperatur reaktor gasifikasi. Zona pembakaran terjadi di dekat grate yang dilanjutkan dengan zona reduksi yang akan menghasilkan gas dengan temperatur yang tinggi. Gas hasil reaksi tersebut akan bergerak menuju bagian atas dari reaktor yang memiliki temperatur lebih rendah dan gas tersebut akan kontak dengan bahan bakar yang bergerak turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pertukaran panas antara gas dengan temperatur tinggi terhadap bahan bakar yang memiliki temperatur lebih rendah. Panas sensible yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Kedua proses tersebut yaitu proses pirolisis dan proses pengeringan terjadi pada bagian teratas dari reaktor gasifikasi.

Kelebihan dari reaktor gasifikasi *updraft* adalah mekanisme kerja yang dimiliki oleh reaktor tipe ini jauh lebih sederhana dibandingkan dengan tipe yang lain, sedangkan dengan mekanisme kerja yang lebih sederhana tersebut, ternyata tingkat toleransi reaktor terhadap tingkat kekasaran bahan bakar lebih baik.

Selain itu jenis reaktor ini memiliki kemampuan untuk mengolah bahan bakar kualitas rendah dengan temperatur gas keluaran relatif rendah dan memiliki efisiensi yang tinggi akibat dari panas gas keluar reaktor memiliki temperatur yang relatif rendah. Sedangkan kelemahan reaktor gasifikasi *updraft* adalah tingkat kadar tar dalam syngas hasil reaksi relatif cukup tinggi sehingga mempengaruhi kualitas dari gas yang dihasilkan serta kemampuan muatan reaktor yang relatif rendah.

b. Downdraft Gasifier

Sistem gasifikasi downdraft memiliki sistem yang hampir sama dengan system gasifikasi updraft yaitu dengan memanfaatkan sistem oksidasi tertutup untuk memperoleh temperatur tinggi.



Gambar 4. Downdraft Gasifier

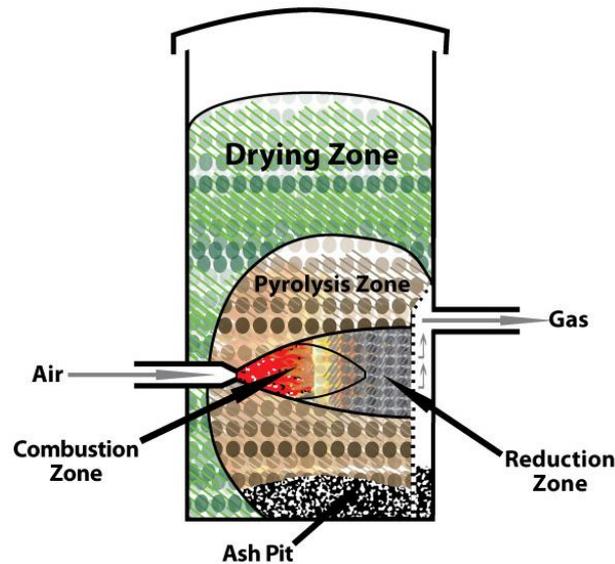
Sumber :<http://engin1000.pbworks.com>(2011)

Bahan bakar dalam reaktor gasifikasi downdraft dimasukkan dari atas reaktor dan udara dari blower dihembuskan dari samping menuju ke zona oksidasi sedangkan syngas hasil pembakaran keluar melalui burner yang terletak di bawah ruangan bahan bakar sehingga saat awal gas akan mengalir ke atas dan saat volume gas makin meningkat maka syngas mencari jalan keluar melalui daerah dengan tekanan yang lebih rendah. Sistem tersebut memiliki maksud agar syngas yang terbentuk akan tersaring kembali oleh bahan bakar dan melalui zona pirolisis sehingga tingkat kandungan tar dalam gas dapat dikurangi. Untuk menghindari penyumbatan gas di dalam reaktor, maka

digunakan blower hisap untuk menarik syngas dan mengalirkannya ke arah burner.

c. Crossdraft Gasifier

Pada Crossdraft gasifier, udara disemprotkan ke dalam ruang bakar dari lubang arah samping yang saling berhadapan dengan lubang pengambilan gas sehingga pembakaran dapat terkonsentrasi pada satu bagian saja dan berlangsung secara lebih banyak dalam suatu satuan waktu tertentu. Sistem Crossdraft Gasifier dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 5. Crossdraft Gasifier

Sumber :<http://engin1000.pbworks.com>(2011)

Setiap alat gasifikasi memiliki karakteristik tersendiri yang membedakan suatu sistem gasifikasi dengan sistem gasifikasi yang lain. Hasil reaksi dan syngas yang dihasilkan dari reaksi gasifikasi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing alat gasifikasi tersebut.

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 Berbagai Jenis *Gasifier*

Tipe <i>Gasifier</i>	Kelebihan	Kekurangan
<i>Updraft</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mekanismenya sederhana - Hilang tekan rendah - Efisiensi panas baik - Arang (<i>charcoal</i>) 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>.
<i>Downdraft</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak terlalu sensitif terhadap tar - Dapat mudah beradaptasi dengan jumlah umpan Biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> - Desain <i>gasifier</i> tinggi - Tidak cocok untuk bahan bakar biomassa yang berukuran kecil
<i>Crossdraft</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Desain <i>gasifier</i> pendek - Sangat responsif ketika diisi umpan biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> - Sangat sensitif terhadap pembentukan terak - Hilang tekan tinggi - Proses hanya ditujukan untuk arang kualitas tinggi - Temperatur gas keluaran Tinggi

Sumber : Rinovianto, 2012

2.8 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 karbon dioksida (CO_2) dan semua hidrogen diubah menjadi air (H_2O) (Irvan Nurtian, 2007). Jika salah satu tidak terpenuhi, maka pembakaran tidak sempurna. Syarat terjadinya pembakaran adalah adanya oksigen (O_2). 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

darisuatu 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 pada tabel 5.

2.9 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 7 dan komposisi masing-masing bahan bakar dan *Syngas* dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 5. Gas Dari Gasifikasi Kayu dan Arang

Komponen	Gas dari kayu (vol.%)	Gas dari arang (vol.%)
Nitrogen	50-54	55-65
Karbon monoksida	17-22	28-32
Karbon dioksida	9-15	1-3
Hydrogen	12-20	4-10
Metan	2-3	0-2
Nilai pemanasan gas (KJ/m ³)	5000-5900	4500-5600

Sumber : Food and Agriculture Organization of The United Nations (1986, p. 17)

Tabel 6. Komponen-Komponen Yang Terkandung Dalam Udara Kering

Komponen	Fraksi Mol
Nitrogen	78,08
Oksigen	20,95
Argon	0,93
Karbondioksida	0,03
Neon, Helium, Metana, dll	0,01

Sumber: Ivan Nurtion, 2007

Tabel 7. Kualitas Gas Produser dari *Gasifier* Biomassa

	<i>Fixed Bed Co-current Gasifier</i>	<i>Fixed Bed Counter-current Gasifier</i>	CFB <i>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

Tabel 8. Nilai Kalori pada Syngas

Gases	H ₂	CO	CH ₄
HHV (MJ/Nm ³) ²	12,74	12,63	39,82
LHV (MJ/Nm ³) ²	10,78	12,63	35,88
Viscosity (μp)	90,00	182,00	122,00
Thermal Conductivity (W/m.K)	0,18	0,02	0,01
Specific Heat (kJ/Kg.K)	3,46	1,05	2,22

Sumber: Kurniawan, 2012

Nilai LHV bahan bakar dan LHV Syngas dapat ditentukan dari komposisi yang terkandung dalam satuan unit massa bahan bakar dan satuan unit volume Syngas.

2.11 Karakteristik Nyala Api

Dalam proses pembakaran, bahan bakar dan udara bercampur dan terbakar dan pembakarannya dapat terjadi baik dalam mode nyala api ataupun tanpa mode nyala api. Bahan bakar merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar. Berdasarkan buku *an introduction to combustion concept and application*, definisi api adalah pengembangan yang bertahan pada suatu daerah pembakaran yang dialokasikan pada kecepatan *subsonic*.

Warna api dipengaruhi oleh dua hal yaitu kandungan bahan bakar dan campuran udara yang ikut terbakar. Ketika api memiliki warna cenderung merah hal tersebut dapat diartikan bahwa bahan terbakar api tersebut memiliki nilai kalor yang relatif rendah, atau udara yang mencampuri proses pembakaran hanya sedikit sehingga campuran kaya. Saat api berwarna kebiruan adalah sebaliknya yang merepresentasikan nilai kalor bahan bakar yang tinggi, atau campuran miskin. Api hidrokarbon dikarakteristikan oleh radiasinya yang tampak. Dengan *excess air*, daerah reaksi akan terlihat biru.

Radiasi biru berasal dari eksitasi CH radikal di dalam daerah bertemperatur tinggi. Saat udara berkurang yang menyebabkan stoichiometrinya berkurang, daerah api akan berwarna biru-hijau yang berasal dari eksitasi C₂. Dalam kedua jenis api OH radikal memberikan kontribusi terhadap radiasi yang tampak. Jika campuran api kaya jelaga akan terbentuk akibat radiasi hitam. Meskipun radiasi

jelaga memiliki intensitas maksimal dalam infra merah, kepekaan spectrum mata manusia menyebabkan kita melihat cahaya kuning terang (mendekati putih) akibat pudarnya emisi oranye, tergantung temperatur api. Terdapat dua tipe mode nyala api, yaitu :

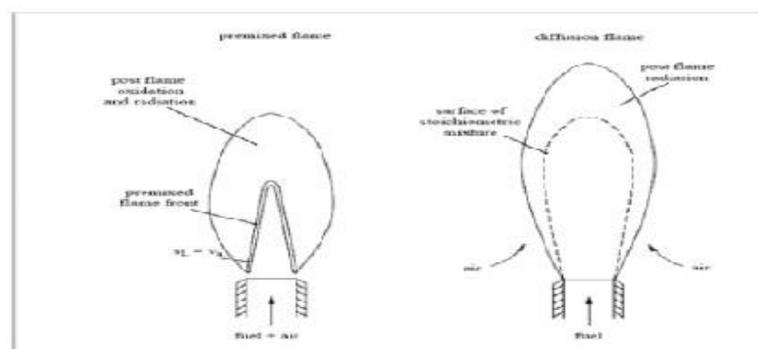
1. *Premixed Flame*

Premixed flame adalah api yang dihasilkan ketika bahan bakar bercampur dengan oksigen yang telah tercampur sempurna sebelum pemberian sumber api. Umumnya indikasi *premixed flame* dapat dilihat dari warna api yang berwarna biru. Laju pertumbuhan api tergantung dari komposisi kimia bahan bakaryang digunakan.

2. *Diffusion Flame (Non-Premixed)*

Diffusion Flame adalah api yang dihasilkan ketika bahan bakar dan oksigen bercampur dan penyalaan dilakukan secara bersamaan. Laju difusi reaktan bisa dipengaruhi oleh energi yang dimiliki oleh bahan bakar. Umumnya pada nyala api difusi pengaruh udara dari luar sebagai oksidator pembakaran berpengaruh pada nyala api yang dihasilkan. Pemunculan dari nyala api akan tergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pemancaran bahan bakar terhadap udara sekitarnya.

Laju pencampuran bahan bakar dengan udara lebih rendah dari laju reaksi kimia. Nyala api difusi pada suatu pembakaran cenderung mengalami pergerakan nyala lebih lama dan menghasilkan asap lebih banyak dari pada nyala *premix*. Nyala difusi berupa nyala laminar (*Laminar Flame*) atau nyala turbulen (*Turbulen Flame*).



Gambar 6. Nyala Api Premix dan Difusi
(Sumber : Turns, 1996)

Selain itu kedua tipe di atas nyala api juga dibedakan berdasarkan jenis aliran yang terjadi, yaitu :

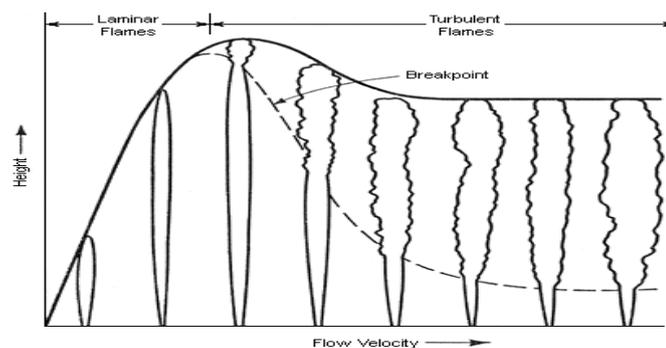
a. Api Laminer

Visualisasi api yang terlihat pada api tipe ini berbentuk secara laminar atau teratur. Api jenis ini memiliki bentuk mengikuti *stream line* aliran tanpa membentuk turbulensi atau gerakan tidak beraturan.

b. Api Turbulen

Api turbulen menunjukkan pola aliran nyala api yang tidak beraturan atau acak yang member indikasi aliran yang bergerak sangat aktif. Pada pembakaran gas hasil gasifikasi menunjukkan indikasi diskontinuitas atau produksi yang cenderung tidak konstan membuat api yang terbentuk juga mengalami hambatan dalam pertumbuhannya. Gas sebagai reaktan akan direaksikan bersama oksigen bersamaan dengan saat penyalaan. Kualitas dari nyala api juga tak lepas dari nilai kalor yang terkandung dalam syngas yang dihasilkan oleh proses gasifikasi. Semakin tinggi kandungan zat yang *flammable* maka kualitas api juga akan semakin tinggi.

Model arus laminar dan arus turbulen pada nyala api ditampilkan pada gambar 7.



Gambar 7. Arus Laminer vs Arus Turbulen pada Nyala Api
(Sumber : Turns, 1996)

Aliran laminar adalah aliran ketika uap kecepatan rendah pada bahan bakar dilepaskan dari kompor. Meningkatnya turbulensi akan meningkatkan propagasi api. Tapi intensitas turbulensi terlalu banyak menyebabkan tingkat propagasi menurun dan menyebabkan api padam. Turbulensi dipengaruhi

aliran bahan bakar yang menguap, kecepatan aliran bahan bakar, dan media penguapan bahan bakar (Bangkeju,2012). Berikut ini beberapa penjelasan mengenai warna dan jenis api:

a. Api Merah

Api berwarna merah /kuning ini biasanya bersuhu dibawah 1000 derajat celcius. Api jenis ini termasuk api yang "kurangpanas" dikarenakan jarang atau kurang sering digunakan dipabrik-pabrik industry baja/material. Kalau pada matahari, api ini berada pada bagian paling luarnya, yaitu bagian yang paling dingin. Nyala api merah ditampilkan pada gambar 5 dibawah ini.



Gambar 8. Nyala Api Merah
(Sumber: Bangkeju,2012)

b. Api Biru

Api berwarna biru merupakan api yang mungkin sering kita jumpai di dapur. Biasanya api ini sering kita lihat di kompor gas. Rata-rata suhu apiyang berwarna biru kurang dari 2000 derajat celcius. Api ini berbahan bakar gas dan mengalami pembakaran sempurna. Jadi tingkatan api biru diatas merah. Nyala api biru ditampilkan pada gambar 9 dibawah ini.



Gambar 9. Nyala Api Biru pada Kompor Gas
(Sumber: Bangkeju,2012)

c. Api Putih

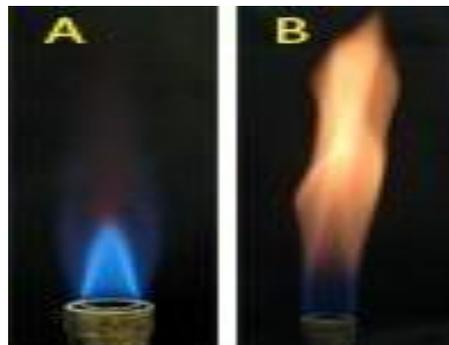
Nyala api ini merupakan api paling panas yang ada di bumi. Warna putihnya itu dikarenakan suhunya melebihi 2000 derajat celsius. Api inilah yang berada di dalam inti matahari, dan muncul akibat reaksi fusi oleh matahari. Api ini paling banyak digunakan di pabrik-pabrik yang memproduksi material besi dan sejenisnya. Nyala api putih ditampilkan pada gambar 10 di bawah ini.



Gambar 10. Nyala Api Putih pada Proses Produksi Pabrik
(Sumber: Bangkeju, 2012)

d. Api Hitam

Nyala api yang paling panas itu berwarna Hitam, dan api hitam murni yang sesungguhnya sangat jarang ditemukan di bumi. Api hitam itu biasanya disimulasikan. Misalnya kita lihat nyala api lilin atau kompor Bunsen dengan seksama, maka ada perbedaan spectrum warna di dalamnya. Nyala Bunsen burner ditampilkan pada gambar 8 di bawah ini.



(a) laminar

(b) turbulen

Gambar 11. Nyala Api Bunsen Burner
(Sumber: Bangkeju, 2012)

Bisa dilihat kalau dibagian pangkal api ada bagian kecil yang warnanya nyaris transparan, Itulah yang disebut dengan api hitam. Karena definisi warna hitam pada spectrum warna cahaya adalah sebenarnya ketiadaan cahaya, jadi kelihatannya transparan. Ini adalah bagian yang paling panas, sehingga kalau mau memanaskan reaksi kimia, tabung uji harus ditempatkan dibagian ini.