

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa merupakan produk fotosintesa dimana energi yang diserap digunakan untuk mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen. Biomasa 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. Biomassa merupakan bahan energi yang dapat diperbaharui karena dapat diproduksi dengan cepat. Biomassa umumnya mempunyai kadar *volatile* relatif tinggi, dengan kadar karbon tetap yang rendah dan kadar abu lebih rendah dibandingkan batubara. Biomassa juga memiliki kadar *volatile* yang tinggi (sekitar 60-80%) dibanding kadar *volatile* batubara, sehingga biomassa lebih reaktif dibandingkan batubara. 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 Kayu

Dalam kehidupan kita sehari-hari, kayu merupakan bahan yang sangat sering dipergunakan untuk tujuan penggunaan tertentu. Terkadang sebagai barang tertentu, kayu tidak dapat digantikan dengan bahan lain karena sifat khasnya. Pengertian kayu disini ialah sesuatu bahan, yang diperoleh dari hasil pemungutan pohon-pohon di hutan, yang merupakan bagian dari pohon tersebut, setelah diperhitungkan bagian-bagian mana yang lebih banyak dimanfaatkan untuk sesuatu tujuan penggunaan. Baik berbentuk kayu pertukangan, kayu industri maupun kayu bakar.

Pada umumnya komponen kimia kayu daun lebar dan kayu daun jarum terdiri dari 3 unsur :

- Unsur karbohidrat terdiri dari selulosa dan hemiselulosa
- Unsur non-karbohidrat terdiri dari lignin
- Unsur yang diendapkan dalam kayu selama proses pertumbuhan dinamakan zat ekstraktif.

Tabel 1. Komposisi Kayu

Unsur	% Berat Kering
Karbon	49
Hidrogen	6
Oksigen	44
Nitrogen	Sedikit
Abu	0,1

Sumber : Mengenal Kayu Cetakan ke 6 J. F. Dumanauw, 2007

a. Pengenalan Sifat-sifat Kayu

Kayu merupakan hasil hutan yang mudah diproses untuk dijadikan barang sesuai dengan kemajuan teknologi. Kayu memiliki beberapa sifat yang tidak dapat ditiru oleh bahan-bahan lain. Pemilihan dan penggunaan kayu untuk suatu tujuan pemakaian, memerlukan pengetahuan tentang sifat-sifat kayu. Sifat-sifat ini penting sekali dalam industri pengolahan kayu sebab dari pengetahuan sifat tersebut tidak saja dapat dipilih jenis kayu yang tepat serta macam penggunaan yang memungkinkan, akan tetapi juga dapat dipilih kemungkinan penggantian oleh jenis kayu lainnya apabila jenis yang bersangkutan sulit didapat secara kontinyu atau terlalu mahal.

Kayu berasal dari berbagai jenis pohon yang memiliki sifat-sifat yang berbeda-beda. Bahkan dalam satu pohon, kayu mempunyai sifat yang berbeda-beda. Dari sekian banyak sifat-sifat kayu yang berbeda satu sama lain, ada beberapa sifat yang umum terdapat pada semua jenis kayu yaitu:

1. Kayu tersusun dari sel-sel yang memiliki tipe bermacam-macam dan susunan dinding selnya terdiri dari senyawa kimia berupa selulosa dan hemi selulosa (karbohidrat) serta lignin (non karbohidrat). Semua kayu bersifat anisotropik, yaitu memperlihatkan sifat-sifat yang berlainan jika diuji menurut tiga arah

utamanya (longitudinal, radial dan tangensial).

2. Kayu merupakan bahan yang bersifat higroskopis, yaitu dapat menyerap atau melepaskan kadar air (kelembaban) sebagai akibat perubahan kelembaban dan suhu udara disekelilingnya.
3. Kayu dapat diserang oleh hama dan penyakit dan dapat terbakar terutama dalam keadaan kering.

b. Sifat Fisik Kayu

1. Berat dan Berat Jenis

Berat suatu kayu tergantung dari jumlah zat kayu, rongga sel, kadar air dan zat ekstraktif didalamnya. Berat suatu jenis kayu berbanding lurus dengan BJ-nya. Kayu mempunyai berat jenis yang berbeda-beda, berkisar antara BJ minimum 0,2 (kayu balsa) sampai BJ 1,28 (kayu nani). Umumnya makin tinggi berat jenis kayu, kayu semakin berat dan semakin kuat pula.

2. Keawetan

Keawetan adalah ketahanan kayu terhadap serangan dari unsur-unsur perusak kayu dari luar seperti jamur, rayap, bubuk dll. Keawetan kayu tersebut disebabkan adanya zat ekstraktif didalam kayu yang merupakan unsur racun bagi perusak kayu. Zat ekstraktif tersebut terbentuk pada saat kayu gubal (bagian tepi atau pinggir dari kayu) berubah menjadi kayu teras (bagian tengah atau inti kayu) sehingga pada umumnya kayu teras lebih awet dari kayu gubal.

3. Warna

Kayu yang beraneka warna macamnya disebabkan oleh zat pengisi warna dalam kayu yang berbeda-beda.

4. Tekstur

Tekstur adalah ukuran relatif sel-sel kayu. Berdasarkan teksturnya, kayu digolongkan kedalam kayu bertekstur halus (contoh: giam, kulim dll), kayu bertekstur sedang (contoh: jati, sonokeling dll) dan kayu bertekstur kasar (contoh: kempas, meranti dll).

5. Arah Serat

Arah serat adalah arah umum sel-sel kayu terhadap sumbu batang pohon. Arah serat dapat dibedakan menjadi serat lurus, serat berpadu, serat berombak, serta terpilin dan serat diagonal (serat miring).

c. Sifat Mekanik Kayu

Ukuran yang dipakai untuk menjabarkan sifat-sifat kekuatan kayu atau sifat mekaniknya dinyatakan dalam kg/cm^2 . Perhitungan berat jenis banyak disederhanakan dalam sistem metrik karena 1 cm^3 air beratnya tepat 1 gr maka berat jenis dapat dihitung secara langsung dengan membagi berat dalam gram dengan volume dalam sentimeter kubik (cm^3). Berdasarkan angka, maka kerapatan (R) dan berat jenis (BJ) adalah sama. Namun, berat jenis tidak mempunyai satuan karena berat jenis adalah nilai relatif.

$$\text{Unit umum} = \text{gr/cm}^3, \text{ kg/m}^3, \text{ pon/kk}^3$$

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat mekanik kayu secara garis besar digolongkan menjadi dua kelompok :

1. Faktor luar (eksternal): pengawetan kayu, kelembaban lingkungan, pembebanan dan cacat yang disebabkan oleh jamur atau serangga perusak kayu.
2. Faktor dalam kayu (internal): BJ, cacat mata kayu, serat miring dsb.

Pengenalan atas sifat-sifat fisik dan mekanik akan sangat membantu dalam menentukan jenis-jenis kayu untuk tujuan penggunaan tertentu. Selain itu hubungan antara berat jenis, ketebalan dan volume kayu diharapkan akan semakin mengurangi ketergantungan konsumen akan suatu jenis kayu tertentu saja sehingga pemanfaatan jenis-jenis kayu yang semula belum dimanfaatkan (jenis-jenis yang belum dikenal umum) akan semakin meningkat. Selain sifat kayu, secara umum jenis kayu digolongkan menurut kekerasan terdiri dari kayu lunak (*soft wood*) dan kayu keras (*hard wood*), sedangkan untuk kebutuhan teknis pembagian jenis kayu terbagi menjadi tingkat keawetan (kelas awet), tingkat kekuatan (kelas kuat) dan tingkat pemakaiannya (kelas pakai).

Tabel 2. Kelas Kayu Kuat

Kelas Kayu Kuat	Berat Jenis	Keteguhan Lentur	Keteguhan Tekan
		maksimum (kg/cm ²)	maksimum (kg/cm ²)
I	Lebih dari 0,9	Lebih dari 1100	Lebih dari 650
II	0,60 - 0,90	725 - 1100	425 - 650
III	0,40 - 0,60	500 - 725	300 - 425
IV	0,30 - 0,40	360 - 500	215 - 500
V	Kurang dari 0,30	Kurang dari 360	Kurang dari 215

Sumber : Handbook of selected Indonesian wood species, 2008

d. Komposisi Kimia Kayu

1. Zat – Zat Makromolekul

Sel kayu terutama terdiri atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Dimana selulosa membentuk kerangka yang dikelilingi oleh senyawa-senyawa lain yang berfungsi sebagai matriks (hemiselulosa) dan bahan-bahan yang melapisi (lignin). Sepanjang menyangkut komponen kimia kayu, maka perlu dibedakan antara komponen-komponen makromolekul utama dinding sel selulosa, poliosa (hemiselulosa) dan lignin, yang terdapat pada semua kayu, dan komponen-komponen minor dengan berat molekul kecil (ekstraktif dan zat-zat mineral). Perbandingan dan komposisi kimia lignin dan poliosa berbeda pada kayu lunak dan kayu keras, sedangkan selulosa merupakan komponen yang seragam pada semua kayu. (Sjostrom.E, 1993)

Unsur-unsur penyusun kayu tergabung dalam sejumlah senyawa organik: selulosa, hemiselulosa dan lignin. Proporsi lignin dan hemiselulosa sangat bervariasi di antara spesies-spesies kayu, dan juga antara kayu keras dan kayu lunak.

Tabel 3. Komponen Kimia Menurut Golongan Kayu

Tipe	% Berat Kering		
	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin
Kayu Keras	40-44	15-35	18-25
Kayu Lunak	40-44	20-32	25-35

Sumber : Mengenal Kayucetakan ke 6 J. F. Dumanauw, 2007

a) Selulosa

Selulosa merupakan komponen kayu yang terbesar, yang dalam kayu lunak dan kayu keras jumlahnya mencapai hampir setengahnya. Selulosa merupakan polimer linear dengan berat molekul tinggi yang tersusun seluruhnya atas β -D-glukosa. Karena sifat-sifat kimia dan fisiknya maupun struktur supramolekulnya maka ia dapat memnuhi fungsinya sebagai komponen struktur utama dinding sel tumbuhan.

b) Poliosa (Hemiselulosa)

Jumlah hemiselulosa dari berat kering kayu biasanya antara 20 dan 30%. Komposisi dan struktur hemiselulosa dalam kayu lunak secara khas berdeda dari kayu keras. Perbedaan-perbedaan yang besar juga terdapat dalam kandungan dan komposisi hemiselulosa antara batang, cabang, akar, dan kulit kayu. Seperti halnya selulosa kebanyakan hemiselulosa berfungsi sebagai bahan pendukung dalam dinding sel.

c) Lignin

Lignin adalah komponen makromolekuler dinding sel ketiga. Lignin tersusun dari satuan-satuan fenilpropan yang satu sama lain dikelilingi berbagai jenis zat pengikat. Persentase rata-ratanya dalam kayu lunak adalah antara 25-35% dan dalam kayu keras antara 20-30%. Perbedaan struktural yang terpenting dari lignin kayu lunak dan lignin kayu keras, adalah bahwa lignin kayu keras mempunyai kandungan metoxil ($-\text{OCH}_3$) yang lebih tinggi.

2. Zat – zat berat molekul rendah

Zat-zat berat molekul rendah berasal dari golongan senyawa kimia yang sangat berbeda hingga sukar untuk membuat sistem klasifikasi yang jelas tetapi komprehensif. Klasifikasi yang mudah dapat dibuat dengan membaginya ke dalam zat organik dan anorganik. Bahan organik lazim disebut dengan ekstraktif, sedangkan bahan anorganik disebut dengan abu.

a) Zat Ekstraktif

Zat ekstraktif umumnya adalah zat yang mudah larut dalam pelarut seperti eter, alkohol, bensin dan air. Banyaknya rata-rata 3-8 % dari berat kayu kering tanur. Termasuk di dalamnya minyak-minyakan, resin, lilin, lemak, tannin, gula, pati, dan zat warna. Zat ekstraktif memiliki arti yang penting dalam kayu karena :

- dapat mempengaruhi sifat keawetan, warna, bau, dan rasa suatu jenis kayu
- dapat digunakan untuk mengenal suatu jenis kayu. (Dumanauw.J.F, 1993)

Zat ekstraktif dapat juga mempengaruhi kekuatan pulp, perekatan dan pengerjaan akhir kayu maupun sifat-sifat pengeringan.

b) Abu

Di samping persenyawaan-persenyawaan organik, di dalam kayu masih ada beberapa zat organik, yang disebut bagian-bagian abu (mineral pembentuk abu yang tertinggal setelah lignin dan selulosa habis terbakar). Kadar zat ini bervariasi antara 0,2 – 1% dari berat kayu.

Tabel 4. Jenis Kayu Kelas Awet dan Kuat

Nama Dagang	Nama Latin	Kelas	
		Awet	Kuat
Kompas	<i>Compassia malacencis</i>	III-IV	I-II
Malas	<i>Parastenon sp.</i>	II-III	I
Loban	<i>Vitex pubercen Vahl / Vitex pinnata L.</i>	I	I-II
Meranti	<i>Shorea platicladus</i>	II-III	II-IV

Sumber : Biro Klasifikasi Indonesia, 1989

Densitas kayu dan komposit kayu beragam antara 0.2 hingga 1.0 g/cm³, dan bobot kayu berdensitas rendah beragam hingga mencapai 3 kali lipat bergantung pada kondisi kadar airnya. Oleh karena itu, dalam banyak hal, statistik kayu mencantumkan volume sebagai unit. Efisiensi energi pembakaran langsung yang berasal dari bahan bakar serpihan kayu relatif tinggi. Ada juga kemungkinan gasifikasi untuk pembangkit listrik atau untuk produksi bahan bakar gas atau cairan. Akan tetapi, ada pertimbangan lebih lanjut yang diperlukan jika menggunakan residu dari industri kayu untuk produksi energi karena kadar airnya bisa mencapai hampir 100% dalam dasar kering dan juga disebabkan ada banyak

jenis limbah. Serbuk gergaji dan kulit kayu yang hanya membutuhkan energi yang kecil dapat digunakan sebagai pelet kayu.

2.3 Kayu Laban (*Vitex pubescens Vahl*)

Pohon Laban (*Vitex pubescens Vahl*) adalah jenis pohon dari keluarga *Lamiaceae*, yang berasal dari sekitaran Asia selatan sampai timur. Ciri umum pohon laban berukuran sedang hingga besar dan dapat mencapai tinggi hingga 40 meter. Batangnya biasanya tanpa banir dan diameternya dapat mencapai 130 cm, beralur dalam dan jelas, kayunya padat dan berwarna keputihan. Kayunya tergolong sedang hingga berat, kuat, tahan lama dan tidak mengandung silika. Kayu basah beraroma seperti kulit. Daun bersilangan dengan atau tanpa bulu halus pada sisi bawahnya. Susunan bunga terminal, merupakan bunga berkelamin ganda, dimana helai kelopaknya bersatu pada bagian dasar membentuk mangkuk kecil, sedang helai mahkotanya bersatu pada bagian dasar yang bercuping 5 tidak teratur. Mahkota putih keunguan, terdapat tangkai dan kepala sari di dalam rongga mahkota, bakal buah di atas dasar bunga (superior). Buah berdaging, bulat hingga lonjong, dengan diameter 5-12 mm yang saat masak berwarna ungu tua. Terdapat 1 – 4 biji dalam setiap buahnya.



Gambar 1. Pohon Laban

Sumber : <http://diansyah86.blogspot.com>, 2013

Tabel 5. Klasifikasi Kayu Laban (*Vitex pubescens* Vahl)

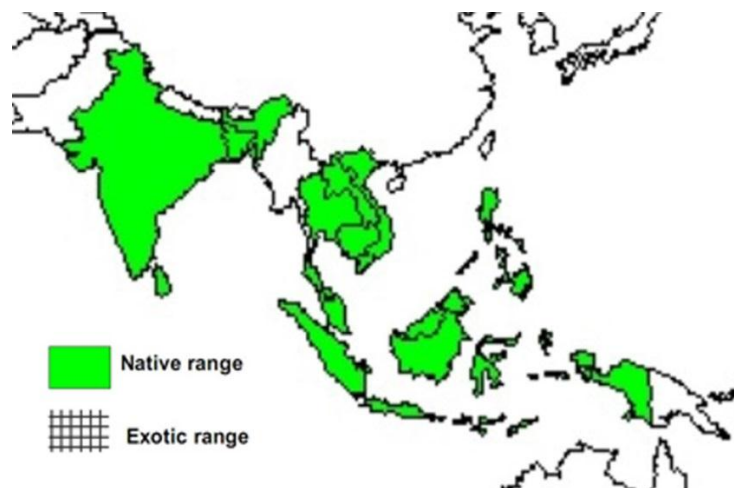
Spesies	<i>Vitex pinnata</i> L.
Sinonim	<i>Vitex pubescens</i> Vahl
Nama Inggris	Vitex
Nama Indonesia	Laban
Nama Lokal	laban (Jawa), laban ketileng (Jawa), laban sungu (Jawa), hegas (Sunda), ki arak (Sunda), lakhan (Madura), gulimpapa (Makasar), halapapa (Dayak), halapapa (Kalimantan Timur), haleban (Lampung), haniban (Sumatera Selatan), laban tanduk (Minangkabau), alaban (Sumatera Barat), maneh (Aceh)
Deskripsi	Tumbuhan berupa pohon, tingginya mencapai ± 25 m, diameter batang 35 - 45 cm, pohon ini mempunyai banyak cabang yang tidak lurus/bengkok serta tidak teratur. Kayunya cukup keras, padat, seratnya lurus, warnanya berselang-seling coklat kuning dan coklat pudar tua. Duduk daun berhadapan, umumnya 3 - 5 daun. Bentuk daun bundar telur sampai lonjong/elip dan meruncing ke ujung dan pangkal daun. Perbungaan terdapat di ujung batang atau di ketiak daun, warna bunga biru tetapi sebelah dalam agak keunguan. Buah termasuk buah batu, bentuk bulat dan sedikit air.
Distribusi/Penyebaran	Terdapat hampir di seluruh Indonesia, Sumatera, Jawa, Madura, Kalimantan, Sulawesi, Bangka, Maluku, Nusa Tenggara, Papua.
Habitat	Tumbuh pada dataran rendah sampai ketinggian ± 800 m dpl. Pada hutan sekunder, hutan jati.
Perbanyakan	Belum pernah dibudidayakan karena pohon laban pertumbuhannya lambat. Sampai saat ini kayu laban merupakan hasil hutan sekunder.
Manfaat tumbuhan	Warna hijau muda diperoleh dari kain dicelup dahulu dalam larutan tom/tarum, kain menjadi berwarna biru, setelah agak kering kain dicelupkan kembali pada larutan kayu laban dan daun dandang gula. Kayu laban mempunyai warna yang indah sehingga banyak dipakai untuk pembuatan perkakas rumah tangga.
Kelas kuat	I - II
Kembang susut	Sedang
Daya retak	Kecil
Kekerasan	Keras
Sifat pengerjaan	Sedang
Kegunaan Kayu	bangunan, kayu perkakas, kayu bengkung
Kategori	Pewarna alami

Sumber : FLORA INDONESIA (Botanical Survival), 2011 & [wikipedia.or/Vitex_pinnata](https://www.wikipedia.org/Vitex_pinnata), 2015)

Kadar air rata-rata kulit kayu laban tua adalah 21,1515 % dan kadar air kulit kayu muda laban adalah 16,3656 %. Dalam penelitian Budihandoko (2010) disebutkan bahwa besarnya kadar air kayu yang terdapat pada pangkal disebabkan air yang terdapat pada ujung batang diserap terlebih dahulu dari pada bagian yang lebih rendah hal ini disebabkan oleh kemampuan atau daya hisap daun ketika berlangsung proses transpirasi (penguapan) pada permukaan sel daun.

Ekologi *Vitex pubescens* Vahl umumnya banyak ditemukan di daerah terutama di habitat yang lebih terbuka, hutan sekunder dan di tepi sungai. Habitat pohon laban ini adalah hutan di dataran rendah sampai ketinggian 2000 m dpl. Laban (*Vitex pubescens* Vahl) tumbuh baik pada tanah berkapur dengan tekstur mulai lempung hingga pasir. Dijumpai di daerah dengan musim basah dan kering yang nyata. Pada musim kemarau pohon laban menggugurkan daunnya. Dalam kondisi tropik seperti di Kalimantan Timur, berbunga dan berbuah hampir sepanjang waktu dari Januari hingga Desember. Buah yang dimakan oleh burung dan biji tidak dapat berkecambah di bawah naungan dan perlu cahaya untuk berkecambah.

Gambar 2 adalah peta dimana spesies *Vitex pubescens* Vahl ini telah ditanam, itu tidak menunjukkan bahwa spesies ini dapat ditanam di setiap zona ekologi di negara tersebut, atau bahwa spesies tidak bisa ditanam selain di zona yang di gambarkan.



Gambar 2. Penyebaran pohon laban

Sumber : Agroforestry Database 4.0 Page 2 of 5 (Orwa et al.2009)

Vitex pinnata memiliki kayu yang sangat kuat dan tahan lama, tahan lama bahkan dalam kontak dengan air atau tanah. kepadatan kayu adalah 800-950 kg/m³ pada kadar air 15%; termasuk kayu yang keras dan tahan lama. Kayu laban ini termasuk dalam kelas awet I yang dapat bertahan delapan tahun walaupun selalu berinteraksi dengan air. Kayu ini pun tahan terhadap serangan oleh rayap. Kayu ini termasuk dalam kelas kuat I yang memiliki berat jenis kering udara maksimum 1,02 gr/cm³, minimum 0,74 gr/cm³ dan berat jenis kering udara rata-rata 0,88 gr/cm³ serta kukuh lentur dan tekanan mutlaknya yang tinggi dibandingkan jenis kayu lain. Umumnya digunakan untuk pembuatan pintu dan bingkai jendela, tempat tidur dan beberapa perabot. Kayunya digunakan untuk konstruksi, daun dan kulit kayu digunakan untuk mengobati sakit perut, demam dan malaria.

Tabel 6. Analisa Proximate dan Ultimate Kayu Laban

Nama	Ultimate Analisis (Oven dry wt.)				Proximate Analisis (Oven dry wt.)		
	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)
<i>Vitex pinnata L.</i>	46,11	5,98	1,65	44,16	2,10	78,60	09,75

Sumber : *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2013

Tabel 7. Unsur Biokimia dan Zat Ekstraktif

Nama	Unsur Biokimia (Oven dry wt.)			Zat Ekstraktif (Oven dry wt.)		
	Selulosa (%)	Lignin (%)	Hemiselulosa (%)	OEC (%)	HEC (%)	TEC (%)
<i>Vitex pinnata L.</i>	42,94	21,13	22,94	2,40	08,49	10,89

OEC-Organic extractive content, HEC-Hot water extractive content ,TEC-Total extractive content (OEC+ HEC).

Sumber : *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2013

Tabel 8. Green Moisture Content, Ash Content, Density dan HHV

Nama	Green moisture content	Ash content	Density	Higher Heating Value	Fuel Value Index
	(%, oven dry wt.)	(%, oven dry wt.)	(g/cc, oven dry wt.)	(MJ/kg, oven dry wt.)	
<i>Vitex pinnata L.</i>	38,23	2,10	0,81	19,14	1931,09

Sumber : *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2013

2.4 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.

2.5 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 °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: $800 < T < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Oksidasi: $700 < T < 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$

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 9. 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)

2.6 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/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 *imberty* 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.

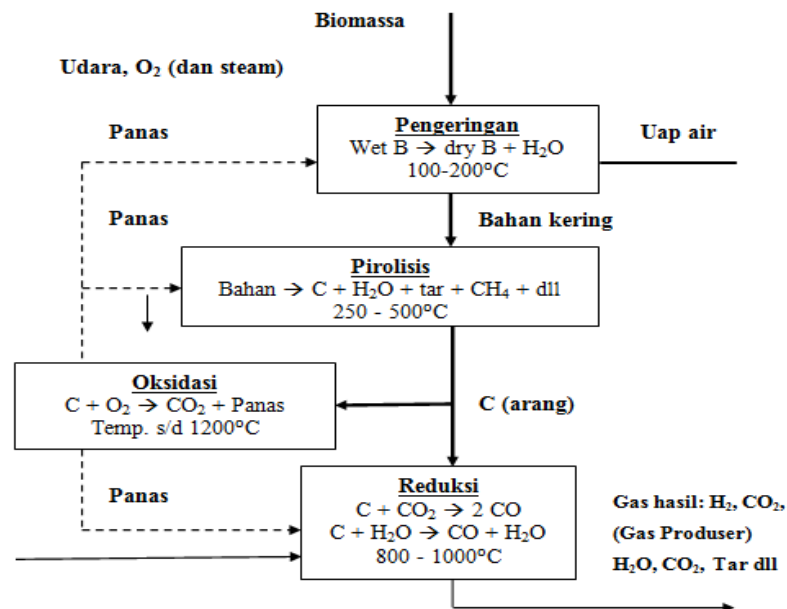
4. Rasio Bahan Bakar dan Udara

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

2.7 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 3. 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 $100^{\circ}C-150^{\circ}C$. 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.

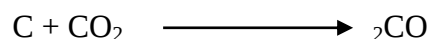
Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Proses pirolisis pada bahan bakar terbentuk pada temperatur antara 150°C sampai 700°C di dalam reaktor. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa arang atau karbon, tar, gas (CO₂, 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

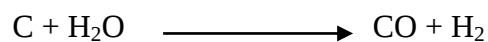
Reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reaksi reduksi terjadi antara temperatur 500°C sampai 1000°C. Pada reaksi ini, arang yang dihasilkan melalui reaksi pirolisis tidak sepenuhnya karbon tetapi juga mengandung hidrokarbon 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 *Bourdouar reaction*, *steam-carbon reaction*, *water-gas shift reaction*, dan *CO methanation*.

Proses reaksi tersebut adalah sebagai berikut :

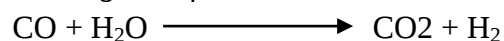
Bourdouar reaction :



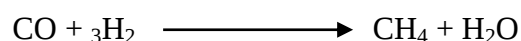
Steam-carbon reaction :



Water-gas shift reaction:

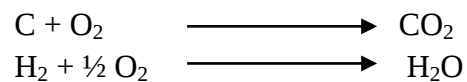


CO methanation :



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 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 :



2.8 Jenis Reaktor

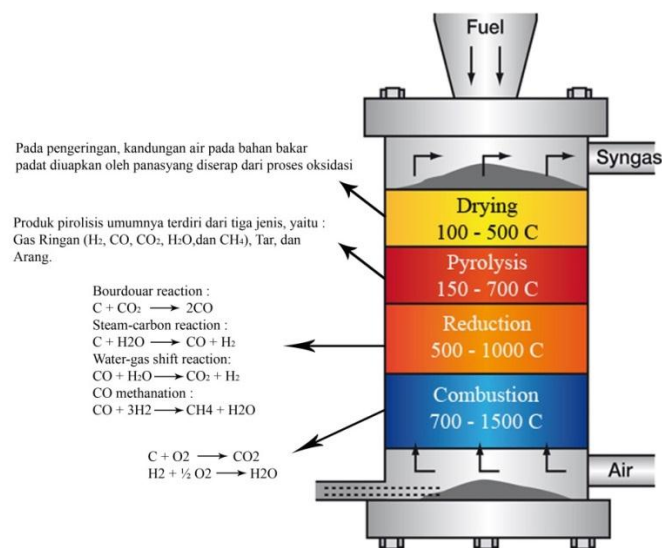
Berdasarkan mode fluidisasinya, gasifier dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: mode gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*), mode gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), mode gasifikasi *entrained flow*. Sampai saat ini yang digunakan untuk skala proses gasifikasi skala 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 4. Updraft Gasifier

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

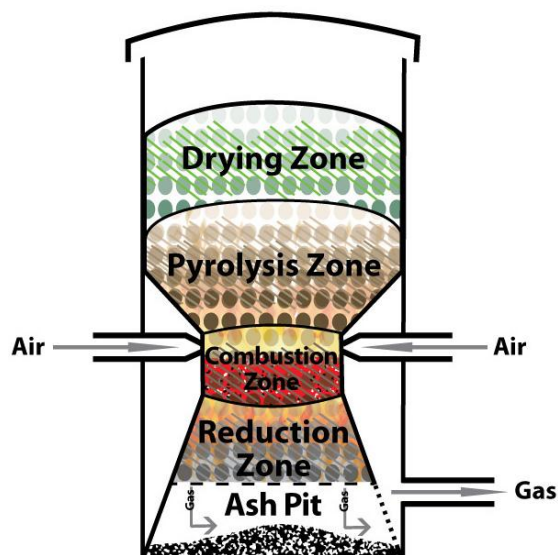
Di dalam reaktor, terjadi zonafikasi area pembakaran berdasarkan pada distribusi temperatur reaktor gasifikasi. Zona pembakaran terjadi di dekat grate yang dilanjutkan dengan zona reduksi yang akan menghasilkan gas dengan temperatur yang tinggi. Gas hasil reaksi tersebut akan bergerak menuju bagian atas 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 reactor 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 5. Downdraft Gasifier

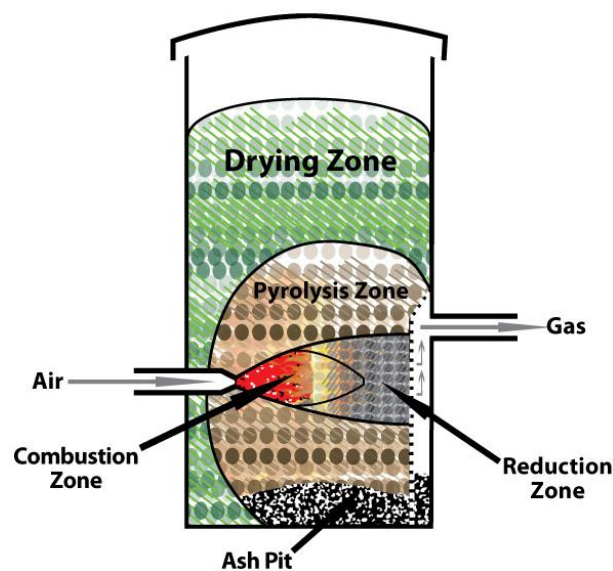
Sumber : <http://engin1000.pbworks.com> (2011)

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 6. 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 5.

Tabel 10. Kelebihan dan Kekurangan Berbagai Jenis Gasifier

Tipe Gasifier	Kelebihan	Kekurangan
<i>Updraft</i>	- Mekanismenya sederhana - Hilang tekan rendah - Efisiensi panas baik - Arang (<i>charcoal</i>) habis terbakar	- Sensitif terhadap tar dan uap bahan bakar - Memerlukan waktu start up yang cukup lama untuk mesin <i>internal combustion</i>.
<i>Downdraft</i>	- Tidak terlalu sensitif terhadap tar - Dapat mudah beradaptasi dengan jumlah umpan biomassa	- Desain <i>gasifier</i> tinggi - Tidak cocok untuk bahan bakar biomassa yang berukuran kecil
<i>Crossdraft</i>	- Desain <i>gasifier</i> pendek - Sangat responsif ketika diisi umpan biomassa	- Sangat sensitif terhadap pembentukan terak - Hilang tekan tinggi - Proses hanya ditujukan untuk arang kualitas tinggi - Temperatur gas keluaran tinggi

Sumber : Rinovianto, 2012

2.9 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 pada tabel 12.

2.10 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 13 dan komposisi masing-masing bahan bakar dan *Syngas* dapat dilihat pada tabel 14.

Tabel 11. 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 12. 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 13. 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

Tabel 14. 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 (μp)	90,00	182,00	122,00
Thermal Conductivity (W/m.K)	0,18	0,02	0,01
Spesific 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 Pehitungan Dasar Gasifikasi

Dalam meninjau kinerja reaktor terdapat beberapa parameter penting yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan ukuran yang sesuai dengan bahan baku yang akan diuji.

1. Perhitungan design reaktor

Dalam merancang bangun alat, perhitungan design reaktor diperuntukan untuk mengetahui proses gasifikasi dengan ukuran yang sesuai secara teori dan dapat membandingkan proses yang terjadi di lapangan. Design reaktor yang perlu diketahui terdiri dari luas, tinggi, diameter, volume reaktor, *fuel consumption rate*, *spesific gasification of wood*, jumlah udara yang dibutuhkan dan waktu operasi berlangsung.

a. *Spesific Gasification Rate (SGR)*

Ini merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan per unit waktu per luas area dari reaktor. SGR dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$SGR = \frac{\text{Weight of woodfuel used (kg)}}{\text{Reactor area (m}^2\text{)} \times \text{operating time (hr)}} \quad \text{Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.69)}$$

Dimana:

SGR = *Spesific Gasification rate, kg/m² jam*

T = *Waktu operasi, hr*

$Rc. Area$ = *Luas reaktor ($2 \pi r t$), m²*

b. Fuel Consumption Rate (FCR)

Jumlah dari kayu yang digunakan dalam pengoperasian di reaktor dibagi dengan waktu operasi. Dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$FCR = \frac{\text{Weight of wood fuel used (kg)}}{\text{Operating time (hr)}} \quad \text{Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.68)}$$

c. Combustion Zone Rate (CZR)

Waktu yang diperlukan untuk pembakaran dari atas hingga bawah reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$CZR = \frac{\text{Lenght of the reactor (m)}}{\text{operating time (hr)}} \quad \text{Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.68)}$$

d. Tinggi reaktor

Hal ini mengacu pada total jarak dari atas hingga bagian bawah reaktor yang perlu diketahui untuk menentukan seberapa lama pengoperasian dalam satu muatan bahan bakar. Pada dasarnya, merupakan fungsi dari sejumlah variabel seperti waktu yang dibutuhkan untuk mengoperasikan *gasifier (T)*, *the spesific gasification rate (SGR)* dan kepadatan kayu. Ketinggian reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho \text{ rice husk}} \quad \text{Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.70)}$$

Dimana:

H = Tinggi reaktor, m

SGR = spesific gasification of wood, kg/m² – hr

T = waktu, hr

ρ = densitas kayu, kg/m³

e. Diameter reaktor

Hal ini mengacu pada ukuran reaktor yaitu berupa diameter yang merupakan penampang reaktor dimana bahan bakar kayu akan dibakar. Diameter reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$D = \left(\frac{1,27 FCR}{SGR} \right)^{0,5}$$

Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.69)

Dimana:

D = Diameter reaktor, m

FCR = fuel consumption rate, kg/jam

SGR = Specific gasification rate of wood, kg/m² – hr

f. Waktu yang diperlukan untuk gasifikasi

Hal ini mengacu pada total waktu yang dibutuhkan untuk mengetahui lamanya pengoperasian berlangsung, yaitu berupa lamanya waktu penyalaan bahan bakar, lamanya proses pembakaran semua bahan baku yang ada didalam reaktor dan waktu perubahan bahan bakar menjadi gas. Waktu yang diperlukan untuk pembakaran bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T = \frac{\rho \times V_r}{FCR}$$

Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.71)

Dimana:

T = Waktu yang diperlukan untuk pembakaran kayu, hr

V_r = Volume reaktor (π r² t), m³

ρ = Densitas kayu, kg/m³

FCR = Laju pembakaran kayu, kg/hr

g. Jumlah udara yang dibutuhkan untuk gasifikasi

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. Laju alir udara dibutuhkan untuk mengubah kayu menjadi gas. Kebutuhan udara dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$AFR = \frac{e \times FCR \times SA}{\rho_{air}}$$

Sumber: (Alexis T. Belonio, 2005, pg.72)

Dimana:

AFR = laju alir udara, m³/hr

ER = equivalence ration, 0.3 – 0.4

FCR = laju pembakaran kayu, kg/hr

SA = stokiometri udara biomasa,

ρ = densitas udara, kg/m³

2. Evaluasi Kinerja reaktor gasifikasi

Dalam meninjau kinerja gasifikasi ada beberapa hal yang menjadi parameter. Knoef et al., (2005) menjelaskan bahwa dalam meninjau gasifikasi terdapat dasar dan parameter yang relevan tentang operasi gasifikasi biomassa, dan kinerja dan design gasifikasi biomassa.

a. *Equivalence Ratio (ER)*

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. Model dari Schalpfer dan Gumz seing menggunakan komposisi gas sebagai fungsi dari temperatur dan/ equivalence ratio (ER), dimana jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran.

$$ER = \frac{fuel-to-oxider-ratio}{(fuel-to-oxider-ratio)stoichiometric}$$

Nilai ekivalen rasio didefinisikan sebagai berikut :

Sumber : (Turns, 2002 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.14)

$$ER, \emptyset = \frac{Air\ to\ fuel\ ratio}{Air\ to\ fuel\ ratio) stoichiometric} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)}{\left(\frac{A}{F}\right)_s}$$

Eqivalen rasio dari proses gasifikasi merupakan salah satu parameter paling penting untuk penyesuaian kondisi operasi (Ramirez et al., 2007). Udara bahan bakar stokiometri untuk pembakaran gasifikasi dapat diperoleh dari:

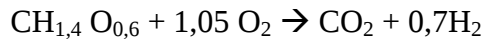
$$(A/F)_s = 8,89 (\%C + 0,375 \times \%S) + 26,5 \times \%H - 3,3 \times \%O$$

Sumber :(Sanchez, 1997 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.14)

Dimana:

- % C Karbon dari kayu
- % H Hidrogen dari kayu
- % O Oksigen dari kayu
- % S Sulfur dari kayu

Rumus yang diberikan untuk pembakaran biomassa dengan oksigen adalah sebagai berikut (Reed and Derosier 1979).



Sumber : (Reed and Derosier 1979 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.14)

b. Superficial velocity

Kecepatan superficial adalah salah satu parameter yang paling penting menentukan kinerja reaktor gasifier, mengendalikan laju produksi gas, kandungan energi gas, tingkat konsumsi bahan bakar, daya output, dan tingkat tar/produksi arang. Kecepatan superficial didefinisikan sebagai laju aliran gas (m^3/s) dibagi dengan luas penampang silinder keramik dalam (m^2) (Knoef et al., 2005).

Kecepatan yang sebenarnya jauh lebih tinggi karena adanya bahan biomassa. Sebuah kecepatan superficial rendah menyebabkan kondisi pirolisis relatif lambat dan hasil arang tinggi dan gas dengan kandungan tar yang tinggi.

$$\text{superficial velocity} = \frac{\text{gas flow rate}}{\text{cross-sectional area}}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

c. Gas Heating Value

Kandungan energi mengacu pada nilai kalor dan itu mempengaruhi output energi gasifier. Ada dua cara untuk menghitung nilai panas gas:

- *Lower Heating Value (LHV)*
- *Higher Heating Value (HHV)*

Dalam penelitian ini LHV digunakan dalam analisis dan dihitung dari:

$$\text{LHV}_{\text{gas}} = 10,768 [\text{H}_2] + 12,696 [\text{CO}] + 35,866 [\text{CH}_4] + 83.800 [\text{C}_n\text{H}_m]$$

Sumber : (Michael Lubwama, 2011, pg.15)

Dalam hal ini untuk mendapatkan LHV didasarkan pada kondisi normal untuk masing-masing gas produser. Persen volumetrik dari hidrogen, karbon monoksida, metana dan setiap hidrokarbon lain yang diketahui dari hasil kromatografi gas.

d. Laju alir dan produksi gas

Laju aliran gas (m^3/s) dapat dihitung dari aliran udara awal jika kandungan nitrogen dalam gas diketahui. Laju alir gas dapat diukur dengan *orifice*, *venturi*, tabung pitot atau rotameter ditempatkan dialiran gas [Knoef et al., 2005].

$$\text{Gas production rate} = \frac{\text{air flow rate} \times \left(\frac{3.76}{4.76}\right)}{\text{Nitrogen mole fraction of dry producer gas}}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

Daya keluaran dari proses gasifikasi diperoleh sebagai berikut:

$$\text{power output (MV)} = \text{gas flow rate} \times \text{LHV}_{\text{gas}}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.15)

e. Heat Energy Input

Jumlah dari energi panas yang tersedia di dalam bahan bakar. Dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{QF} = \text{WFU} \times \text{HVF}$$

Dimana:

QF: Energi panas dalam bahan bakar, Kcal

WFU: Berat bahan bakar yang digunakan, kg

HVF: Nilai kalor bahan bakar, Kcal/kg

f. Power Input

Merupakan jumlah energy yang disuplai ke reaktor berdasarkan jumlah bahan bakar yang di konsumsi :

$$\text{Power input (Pi)} = 0.00012 \times \text{FCR} \times \text{HVF}$$

Sumber : (Michael Lubwama, 2011, pg.15)

g. Power Output

Jumlah energy yang dilepaskan selama pembakaran dalam reaktor.

$$\text{Power output (MV)} = \text{gas flow rate} \times \text{LHV}_{\text{gas}}$$

Sumber : (Michael Lubwama, 2011, pg.15)

h. Efisiensi gasifikasi

Efisiensi gasifier dapat dinyatakan secara dingin atau panas. Efisiensi gas dingin adalah kandungan energi kimia dari gas produser dibagi dengan kandungan energi dari biomassa, sedangkan efisiensi gas panas merupakan kandungan energi panas dari gas produser dibagi dengan kandungan energi dari biomassa. Efisiensi gas panas diperoleh dengan memperhitungkan panas yang terkandung dalam gas sedangkan efisiensi gas dingin diperoleh ketika gas didinginkan setelah meninggalkan *gasifier* untuk suhu lingkungan. (Knoef et al., 2005).

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{\text{chemical energy content of product gas}}{\text{energy content of biomass fuel}}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.16)

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{Q \times \text{LHV gas}}{\text{LHV fuel} \times m_f}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.16)

Dimana:

Q = laju produksi gas

m_f = massa bahan bakar

$$\text{Hot gas efficiency} = \frac{\text{chemical and heat energy content of product gas}}{\text{energy of biomass fuel}}$$

$$\text{Hot gas efficiency} = \frac{Q \times (\text{LHV gas} + \text{sensible heat of hot gas})}{m_f \times \text{LHV fuel}}$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.16)

Efisiensi gasifikasi adalah persentase energi kayu dikonversi ke produk gas dingin (bebas dari tar). Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung efisiensi gasifikasi.

$$\eta = \left(\frac{\text{Amount of gas produced} \times \text{LCV of Gas}}{\text{Quantity of Husk used} \times \text{LCV of wood}} \right) \times 100$$

Sumber : (Knoef et al., 2005 dalam Michael Lubwama, 2011, pg.16)

3. Perhitungan Total Tar

a. Neraca Karbon

- Menghitung karbon pada bahan baku

Massa bahan baku x % C bahan baku (sumber: Hougen, Pg.434)

- Menghitung karbon pada tar

$$\frac{\text{massa tar in celullosa}}{\text{massa bahan baku}} \times \% C \text{ in tar} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.434})$$
 - Berat refuse

$$\frac{\text{berat ash}}{\% \text{ ash pada refuse}} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.434})$$
 - Karbon refuse

$$\text{Berat refuse} \times \% FC \text{ in refuse} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.434})$$
 - Karbon tergasifikasi

$$C \text{ bahan baku} - (C \text{ in tar} + C \text{ in refuse}) \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.434})$$
- b. Menghitung tar di syngas
- Menghitung total karbon di gas

$$\text{Berat tar} \times \% C \text{ in tar} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.435})$$

$$\text{Total karbon} = C \text{ in clean gas} + C \text{ in tar} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.435})$$
 - Menghitung mol dari gas kering

$$\frac{\text{Karbon Tergasifikasi}}{\text{Total C in gas}} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.435})$$
 - Menghitung total tar

$$C = \text{mol gas kering} \times \text{mol c in tar} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.436})$$

$$H = \text{mol gas kering} \times \text{weight of tar} \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.436})$$

$$\text{Total tar} = C + H \quad (\text{sumber: Hougen, Pg.436})$$
- c. Menghitung Persen Daya Serap Filter Jerami
- $$\% \text{ Daya Serap Jerami} = \frac{\text{Berat tar terserap filter jerami}}{\text{total tar}} \times 100\%$$