

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ampas Tebu

Tebu (*Saccharum officinarum*) merupakan tanaman yang ditanam untuk bahan baku gula. Tanaman ini hanya dapat tumbuh di daerah beriklim tropis. Tanaman ini termasuk jenis rumput-rumputan. Umur tanaman sejak ditanam sampai bisa dipanen mencapai kurang lebih 1 tahun. Di Indonesia tebu banyak dibudidayakan di pulau Jawa dan Sumatra (Anonim, 2007). Ampas tebu atau lazimnya disebut *bagasse*, adalah hasil samping dari proses ekstraksi (pemerahan) cairan tebu. Dari satu pabrik dihasilkan ampas tebu sekitar 35 – 40% dari berat tebu yang digiling (Indriani dan Sumiarsih, 1992). Ampas merupakan hasil samping dari proses ekstraksi tebu, dengan komposisi : 46-52% air, 43-52% sabut dan 2-6% padatan terlarut. Departemen Pertanian melaporkan bahwa produksi tebu nasional saat ini adalah 33 juta ton/tahun (Dirjenbun, 2014). Dengan asumsi bahwa persentase ampas dalam tebu sekitar 30-34%, maka pabrik gula yang ada di Indonesia berpotensi menghasilkan ampas tebu rata-rata sekitar 9,90-11,22 juta ton/tahun. Sementara itu, berdasarkan data yang ada, kapasitas terpasang industri *pulp* di Indonesia saat ini sebesar 6,28 juta ton per tahun. Dengan tingkat utilisasi 82%, maka kemampuan nyata produksi adalah sebesar 5,7 juta ton per tahun, atau setara dengan bahan baku kayu bulat sebesar 26 juta m³ per tahun. Saat ini pasokan bahan baku *pulp* dan kertas dipenuhi dari realisasi HTI *pulp* yang luasnya 382.000 ha, dan menghasilkan kayu sekitar 7,7 juta m³ per tahun. Ini berarti terdapat kekurangan bahan baku kayu untuk industri pulp sebesar 18,3 juta m³ per tahun atau setara dengan 1,2 juta ha.

Ampas tebu sebagian besar mengandung *ligno-cellulose*. Panjang seratnya antara 1,7 sampai 2 mm dengan diameter sekitar 20 mikro, sehingga ampas tebu ini dapat memenuhi persyaratan untuk diolah menjadi papan-papan buatan. Bagase mengandung air 48 - 52%, gula rata-rata 3,3% dan serat rata-rata 47,7%. Serat bagase tidak dapat larut dalam air dan sebagian besar terdiri dari selulosa, pentosan dan lignin (Husin, 2007). Hasil analisis serat bagas adalah seperti pada

tabel 1. Berdasarkan bahan kering, ampas tebu adalah terdiri dari unsur C (carbon) 47%, H (Hydrogen) 6,5%, O (oxygen) 44% dan abu (Ash) 2,5%. Menurut rumus Pritzelitz (Hugot, 1986) tiap kilogram ampas dengan kandungan gula sekitar 2,5% akan memiliki kalor sebesar 1825 kkal/kg.

Tabel 1. Komposisi Kimia Ampas Tebu

Kandungan	Kadar (%)
Abu	3,82
Lignin	22,09
Selulosa	37,65
Sari	1,81
Pentosan	27,97
SiO ₂	3,01

Sumber: Husin (2007)

Secara keseluruhan, lahan perkebunan tebu di Indonesia saat ini mencapai kurang lebih 400.000 hektar, dimana sebagian besar (lebih dari 95%) di antaranya berada di Jawa dan Sumatera, dan sisanya berada di Sulawesi.

Tabel 2. Lahan Perkebunan Tebu

Nama Provinsi	Luas Kebun (ha)	Persentase (%)
Sumatera Utara	13.140	3,30
Sumatera Selatan	12.479	3,13
Lampung	105.915	26,59
Jawa Barat	21.956	5,51
Jawa Tengah	50.958	12,80
DI Yogyakarta	3.282	0,82
Jawa Timur	171.915	43,17
Sulawesi Selatan	9.398	2,36
Gorontalo	9.217	2,31
TOTAL	398.260	100,00

Sumber : BKPM, 2008

Pada umumnya, pabrik gula di Indonesia memanfaatkan ampas tebu sebagai bahan bakar bagi pabrik, setelah ampas tebu tersebut mengalami pengeringan. Disamping untuk bahan bakar, ampas tebu juga banyak digunakan sebagai bahan baku pada industri kertas, *particleboard*, *fibreboard*, dan lain-lain (Indriani dan Sumiarsih, 1992). Saat ini berkembang isu mengenai pemanfaatan ampas tebu (*bagasse*) sebagai bahan alternatif industri *pulp* dan kertas. Berkaitan dengan isu tersebut Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan Badan Litbang Departemen Kehutanan melakukan kajian terhadap permasalahan yang

dihadapi dalam pemanfaatan *bagasse* untuk bahan baku alternatif industri *pulp* dan kertas.



Gambar 1. Tanaman Tebu

Karakteristik Ampas Tebu

Berikut karakteristik biomassa ampas tebu berupa analisa proximate dan ultimate yang diambil dari jurnal “*2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA*”.

Tabel 3. Analisa Proximate dan Ultimate Ampas Tebu

Komponen	Bagasse
Bulk density, kg/m ³	580
Nilai kalor, kkal/kg	1825
A. Proximate Analysis	
1. Moisture content (% weight)	49
2. Fixed Carbon (% weight)	7
3. Volatile matter (% weight)	42,5
4. Ash content (% weight)	1,5
B. Ultimate Analysis	
1. Carbon (% weight)	23,7
2. Hydrogen (% weight)	3,0
3. Oxygen (% weight)	22,8
4. H ₂ O (% weight)	49,0
5. Ash	1,5

Sumber: ICSEEA, 2014

Dari data pada tabel 3 dapat diamati persentase kandungan unsur-unsur yang terdapat dalam biomassa secara fisik maupun kimiawi. Kandungan karbon dan oksigen menunjukkan jumlah yang cukup dominan, unsur-unsur ini menjadi komponen utama dalam reaksi pembentukan syngas. Kandungan C dan H yang cukup tinggi mampu menghasilkan nilai kalor gas yang cukup potensial untuk dimanfaatkan. Kandungan moisture ampas tebu yang relatif rendah tidak membutuhkan energi yang terlalu besar untuk menghilangkannya. Kadar air yang

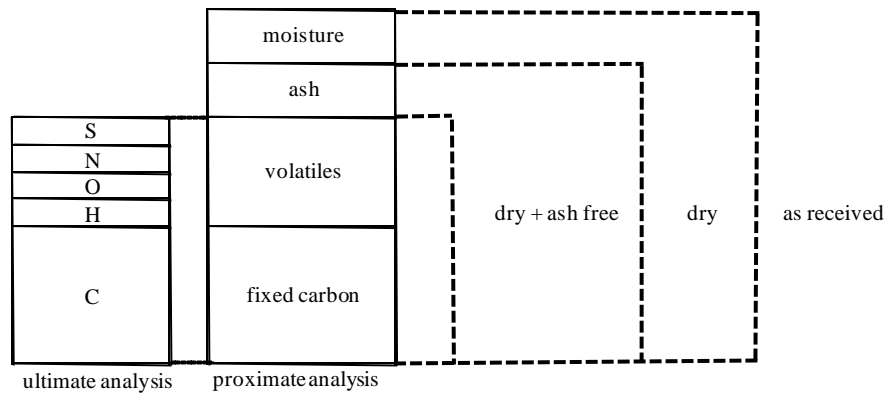
dikandung akan dikeluarkan dari biomassa dengan pemanasan. Bila kandungan moisture terlalu tinggi maka dibutuhkan energi aktivasi pengeringan yang tinggi. Kandungan moisture yang teruapkan mampu memperbesar produksi H₂ (*flammable component*), namun untuk menjaga proses produksi H₂ dibutuhkan energi yang cukup besar dari proses eksoterm, dimana dalam proses eksoterm menghasilkan CO₂ yang bersifat tidak bisa terbakar. Energi hasil proses eksoterm yang terambil pada produksi H₂ dari *moisture* justru mengurangi energi yang diperlukan pada proses produksi H₂ dan CO yang *flammable* dari reaksi endoterm, sehingga hal itu cukup merugikan. Nilai kalor yang dimiliki ampas tebu yang cukup tinggi membuat proses gasifikasi mampu tercapai dengan mudah.

2.2 Analisa Proximate

Kandungan yang dimiliki biomassa contohnya ampas tebu mempengaruhi proses gasifikasi yang akan dilalui, dan dari kandungan inilah struktur biomassa tersusun. Untuk mengetahui karakter dan komposisi dari biomassa digunakan metode pemeriksaan secara analitis (*proximate analyze*). Analisa *proximite* mengidentifikasi kandungan air (*moisture*), *volatile matter* (ketika dipanaskan sampai 950 °C), *fixed carbon*, dan abu yang dimiliki oleh ampas tebu.

Gambar 2 menjelaskan komponen yang terkandung dalam biomassa dalam analisa secara ultimate dan proximate. Untuk mendapatkan unsur yang diperlukan yaitu C, S, N, O, H maka kandungan *moisture* dari biomassa harus dikeluarkan terlebih dahulu, *moisture* yang keluar akan membentuk molekul H₂O. Proses devolatilisasi atau pengeluaran volatil dari biomassa menghasilkan unsur-unsur C, H, O dan bernama *fixed carbon* dari biomassa bereaksi bersama udara media gasifikasi membentuk *syngas*, sedangkan *ash* akan terbentuk sebagai sisa hasil proses. Dibandingkan dengan batubara, biomassa mempunyai kadar *volatile* yang lebih tinggi (sekitar 60-80%) dan kadar karbon tetap yang lebih rendah serta kadar abu yang juga lebih rendah (Suyitno, 2007), sehingga dapat dikatakan biomassa lebih reaktif dibanding batubara. Pada pembakaran maupun gasifikasi, abu dari biomassa juga lebih aman karena banyak mengandung mineral seperti fosfat dan

potassium. Pada temperatur operasi tidak lebih dari 950°C atau 1000°C , abu dari biomassa tidak menimbulkan terak.



Gambar 2. Analisa Proximate dan Ultimate (Suyitno, 2007)

2.3 Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan suatu angka yang menyatakan jumlah energi panas (kalor) yang dilepaskan bahan bakar pada waktu terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut. Nilai kalor berhubungan langsung dengan kadar C dan H yang dikandung oleh bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya, maka makin besar pula nilai kalor yang dikandung.

Ditinjau dari nilai kalor bahan bakar dibedakan atas:

1. Nilai Kalor Atas atau *high heating value* (HHV) adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar yang memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud cair).
2. Nilai Kalor Bawah atau *low heating value* (LHV) adalah nilai kalor yang diperoleh dari pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud gas atau uap).

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 padi merupakan limbah pertanian tanaman pangan sebagian besar penduduk Indonesia. Limbah jerami yang cukup tinggi produksinya ini, dapat menimbulkan permasalahan pencemaran apabila tidak dimanfaatkan dengan baik. Untuk itu, jerami harus dimanfaatkan serta dikelola dengan baik. Jerami mempunyai sumber hara untuk tanah yang sangat potensial. Dari keseluruhan produksi jerami, sebagian besar masih dibakar dan dikembalikan ke tanah. Efek negatif dari pembakaran adalah polusi lingkungan, mempengaruhi ekologi tanah dan hilangnya bahan organik.

Jerami merupakan golongan kayu lunak yang mempunyai komponen utama selulosa. Selulosa adalah serat polisakarida yang berwarna putih yang merupakan hasil dari fotosintesa tumbuh-tumbuhan. Jumlah kandungan selulosa dalam jerami antara 35-40%. Kandungan lain pada jerami adalah lignin dan komponen lain yang terdapat pada kayu dalam jumlah sedikit.

Tabel 4. Komposisi Kimia Jerami Padi

Senyawa	Komposisi Jerami Kering
Air (%)	12
Protein (%)	6,8
Lemak (%)	2,3
Karbohidrat(%)	74
Kalsium (mg/100gr)	0,32
Phospor (mg/100gr)	0,17

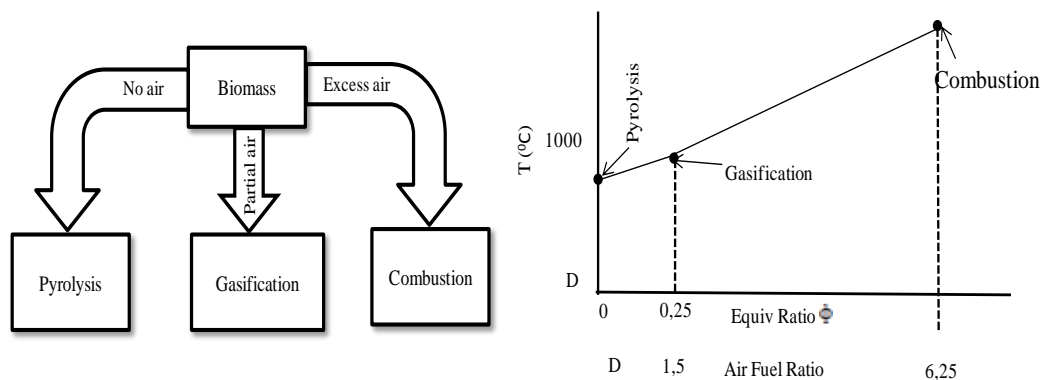
Sumber: Anggorodi, 1979

Keunggulan jerami padi:

1. Relatif tahan pada suhu panas
2. Tidak mudah membusuk, dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama sebagai absorben
3. Dapat dimanfaatkan sebagai briket bahan bakar, penghasil bio-ethanol dan gas hidrogen dalam suatu konversi energi
4. Tersedia dalam jumlah banyak dan murah

2.5 Proses Konversi Biomassa

Pada dasarnya, unsur utama yang membangun biomassa terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen (C, H dan O), sehingga dapat dikategorikan sebagai unsur hidrokarbon namun belum mengalami proses pelapukan secara kimiawi dengan jangka waktu lama seperti halnya bahan bakar fosil lain. Hal inilah yang mendasari bahwa biomassa juga dapat dikonversi menjadi energi. Proses konversi biomassa ini dapat dilakukan secara langsung maupun tidak. Konversi secara langsung dapat dilakukan dengan proses pembakaran, sedangkan onversi secara tidak langsung dapat dilakukan dengan proses pirolisis dan gasifikasi. Yang membedakan keduanya dengan proses pembakaran adalah hasil prosesnya dan perbandingan antara jumlah bahan bakar (biomassa) dengan udara yang digunakan (AFR), seperti terlihat pada skema berikut:



Gambar 3. Perbandingan Udara-Bahan Bakar

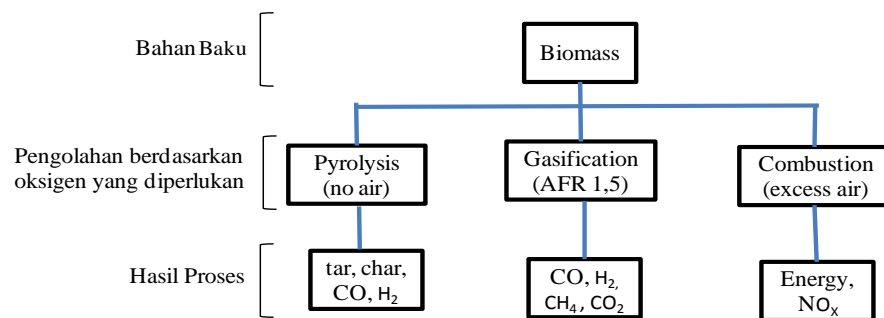
Perbandingan Udara-Biomass (AFR) :

$$AFR = \frac{\text{Total Laju alir massa udara masuk}}{\text{Laju alir biomassa}} \quad (\text{J. Joan Manya, 2005})$$

Dapat dilihat dari Gambar 3 dimana dalam pengolahan biomassa terdapat 3 jenis yaitu gasifikasi, pembakaran, dan pirolisis. Yang membedakan antara ketiganya adalah perbandingan udara bahan bakar yang digunakan. Pirolisis merupakan proses penguraian biomassa yang dilakukan tanpa adanya oksigen atau udara di dalam prosesnya. Pada proses pirolisis terjadi pada temperatur 300-700°C. Pirolisis disebut juga proses devolatisasi, ketika moisture dari biomassa sudah dikeluarkan maka temperatur yang terus meningkat akan membuat volatil

keluar dari pori-pori biomassa yang menyebabkan oksigen tidak mampu melakukan penetrasi kebagian dalam biomassa.

Gasifikasi merupakan proses konversi biomassa secara termokimia memanfaatkan sistem dengan kandungan oksigen terbatas untuk bereaksi namun tidak cukup untuk terjadi pembakaran menghasilkan syngas (CO , H_2 , CH_4). Proses ini menggunakan perbandingan bahan bakar tidak lebih dari 1,5. Proses pirolisis dan gasifikasi sama-sama menghasilkan syngas dengan komposisi utamanya mengandung karbon monoksida dan hidrogen, namun dalam gasifikasi reaksi yang terjadi lebih berkelanjutan sehingga mampu dihasilkan syngas dengan jumlah lingkungan.



Gambar 4. Skema Konversi Biomassa

Pada gambar 4 dijelaskan proses pembakaran dilakukan dengan mereaksikan biomassa dengan akses udara langsung untuk menghasilkan energi. Apabila dibandingkan, proses konversi dengan gasifikasi lebih dipilih karena *syngas* yang dihasilkan lebih mudah diatur pembakarannya, emisi yang dihasilkan lebih ramah lingkungan, serta gas yang dihasilkan (CO , CH_4 , H_2) bisa digunakan sebagai penggerak awal pembakaran. Pada pembakaran langsung efisiensi yang dihasilkan lebih kecil karena lebih banyak rugi-rugi panas yang terjadi, dan emisi yang dihasilkan berupa NO_x .

2.6 Komponen Unit Gasifikasi

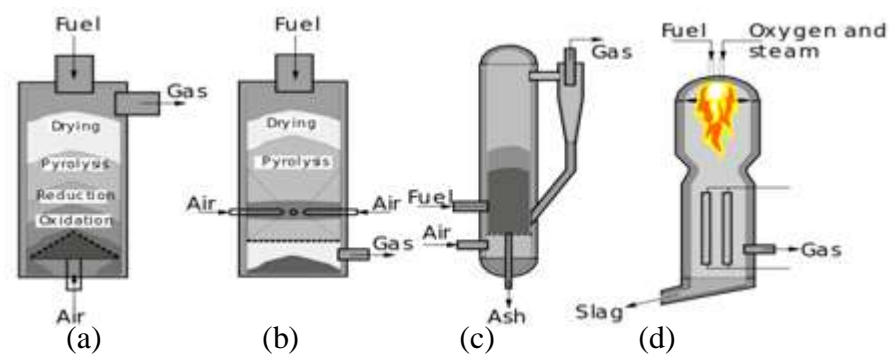
Dalam proses gasifikasi terdapat beberapa komponen utama antara lain yaitu:

2.6.1 Reaktor

Reaktor adalah suatu alat proses tempat di mana terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia atau nuklir dan bukan secara fisika. Reaktor

merupakan bagian utama dari unit gasifikasi sebagai tempat terjadinya proses pembakaran dan reaksi dari perubahan energi biomassa. 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 menyalang (*crossdraft gasifier*). Pada *updraft gasifier*, arah aliran padatan ke bawah sedangkan arah aliran gas ke atas. Pada *downdraft gasifier*, arah aliran gas dan arah aliran padatan adalah sama-sama ke bawah. Sedangkan gasifikasi *crossdraft* arah aliran gas dijaga mengalir mendatar dengan aliran padatan ke bawah (Hantoko, dkk.,2011)



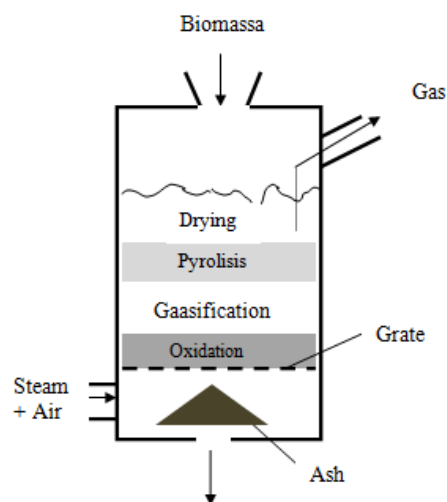
Gambar 5. Tipe Gasifier Berdasarkan Arah Aliran

Keterangan: (a) = Tipe *Updraft*
 (b) = Tipe *Downdraft*
 (c) = Tipe *Fluidized Bed*
 (d) = Tipe *Entrained Bed*

Reaktor tipe updraft

Gasifikasi updraft merupakan reaktor gasifikasi yang umum digunakan secara luas. Reaktor tipe ini bahan bakar dan udara bergerak dengan arah yang berlawanan.

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 biasanya terjadi pada suhu rendah (sekitar 400°C) sehingga banyak mengandung hidrokarbon dan tar. Reaktor ini menghasilkan tar sekitar 30% dari sejumlah biomassa yang digunakan.



Gambar 6. Reaktor tipe *updraft*

(sumber: teknoperta.wordpress.com, 2015)

Produksi gas dikeluarkan melalui bagian atas dari reaktor sedangkan abu pembakaran jatuh ke bagian bawah gasifier karena pengaruh gaya gravitasi dan berat jenis abu. 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 (Gumanti Humala, A, 2012).

2.6.2 Sensor temperatur

Sensor temperatur berguna untuk mengetahui seberapa besar temperatur yang terjadi di dalam reaktor. Terdapat empat titik lokasi temperatur yang diamati dalam proses gasifikasi, titik yang diamati tersebut sesuai dengan tahapan dari proses gasifikasi yaitu *drying*, *pyrolysis*, *reduction* dan *oxidation*. Disamping itu juga terdapat sensor temperatur untuk mengetahui temperatur gas yang dihasilkan.

Tabel 5. Kelebihan dan Kekurangan *Updraft Gasifier*

Tipe <i>Gasifier</i>	Kelebihan	Kekurangan
<i>Updraft</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mekanismenya sederhana - Hilang tekan rendah - Efisiensi panas baik - Kecenderungan membentuk terak sedikit - Arang (charcoal) habis terbakar 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensitif terhadap tar dan uap bahan bakar - Memerlukan waktu start up yang cukup lama untuk mesin <i>internal combustion</i>.

(Sumber: Gumanti, 2011)

2.6.3 *Cyclone* (Pemisah)

Cyclone adalah alat yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal dan tekanan rendah karena adanya perputaran untuk proses pemisahan gas dan material padat berdasarkan perbedaan massa jenis, ukuran, dan bentuk yang ikut terhisap sehingga gas yang keluar tidak mengandung material padat.



Gambar 7. *Cyclone* (pemisah)

(sumber: www.che.iitb.ac.in, 2015)

Endapan dari material padat berupa tar akan jatuh ke sisi kerucut menuju tempat pengeluaran karena pengaruh gravitasi dan dikeluarkan langsung melalui *valve* pembuka.

2.6.4 Alat Pendingin

Cooler berfungsi untuk menurunkan temperatur/suhu gas yang keluar dari reaktor. Proses pendinginan gas dilakukan dengan menggunakan media air untuk menurunkan suhu. Air yang digunakan untuk alat penukar panas disirkulasikan pada kolam reservoir untuk menjaga temperaturnya tetap dingin.

2.6.5 Filter/penyaring

Filter berfungsi sebagai penyaring gas yang keluar dari alat pendingin untuk memisahkan gas dari partikel padat berupa debu dan tar. Saringan ini menggunakan jerami padi yang memiliki pori-pori halus yang berfungsi untuk menangkap partikel halus yang terbawa gas.

2.6.6 Burner

Burner berfungsi sebagai tempat untuk pembakaran terhadap *syngas* yang dihasilkan.

2.7 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, ampas tebu 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: $T < 150$ °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.

2.8 Faktor Yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi

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

2.8.1 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 $CH_{1.2}O_{0.5}$, terjadi pada temperatur pirolisis yang kemudian terkondensasi dalam bentuk asap, namun pada beberapa

kejadian tar dapat berupa zat cair pada temperatur yang lebih rendah. Apabila hasil gas yang mengandung tar relatif tinggi dipakai pada kendaraan bermotor, dapat menimbulkan deposit pada karburator dan intake valve sehingga menyebabkan gangguan. Desain gasifier yang baik setidaknya menghasilkan tar tidak lebih dari 1 g/m³.

e. *Ash dan Slagging*

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

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

2.8.2 Desain Reaktor

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

2.8.3 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.

2.8.4 Rasio Bahan Bakar dan Udara

Perbedaan dasar antara pembakaran dan gasifikasi adalah besarnya rasio udara – bahan bakar (AFR) yang digunakan. Studi yang dilakukan oleh Joan J. Manya dkk, pada dasarnya dititikberatkan pada penggunaan variasi rasio antara

bahan bakar (AFR) yang ditunjukkan dengan λ terhadap laju gas hasil, komposisi gas hasil, dan efisiensi gas hasil yang telah didinginkan. Dalam hal ini biomassa yang digunakan adalah endaoan kotoran cair yang telah dikeringkan. Dari hasil percobaan diperoleh bahwa seiring dengan meningkatnya AFR, laju gas dihasilkan semakin bertambah. Sebaliknya, komposisi gas hasil utamanya H_2 , CO , CH_4 , C_2H_6 dan LHV gas yang dihasilkan akan menurun karena dengan adanya penambahan jumlah udara akan mengurangi kepekatan gas itu sendiri.

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.

2.9 Tahapan Proses Gasifikasi

Proses gasifikasi terdiri dari empat tahapan proses atas dasar perbedaan rentang kondisi temperatur, yaitu pengeringan ($T > 150^\circ C$), pirolisis ($150 < T < 700^\circ C$), oksidasi ($700 < T < 1500^\circ C$), dan reduksi ($800 < T < 1000^\circ C$) (lihat Gambar 1). Proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi bersifat menyerap panas (endotermik), sedangkan proses oksidasi bersifat melepas panas (eksotermik). Panas yang dihasilkan dalam proses oksidasi digunakan dalam proses pengeringan, pirolisis dan reduksi. Bahan kering hasil dari proses pengeringan mengalami proses pirolisis, yaitu pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari arang. Hasil pirolisis berupa arang mengalami proses pembakaran dan proses reduksi yang menghasilkan gas produser yaitu, H_2 dan CO (Pranolo, 2010).

2.9.1 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.

2.9.2 Proses Pirolisis

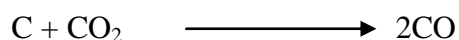
Pada pirolisis, pemisahan volatile matters (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari padatan karbon bahan bakar menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi sehingga pirolisis (devolatilisasi) disebut juga gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi 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.

2.9.3 Proses Reduksi

Reduksi melibatkan suatu rangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Reaksi reduksi terjadi antara temperatur 500°C sampai 1000°C. Pada reaksi ini, arang yang dihasilkan melalui reaksi pirolisis tidak sepenuhnya karbon tetapi juga mengandung hidrokarbon yang terdiri dari hidrogen dan oksigen. Untuk itu, agar dihasilkan gas mampu bakar seperti CO, H₂ dan CH₄ maka arang tersebut harus direaksikan dengan air dan karbon dioksida. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia, diantaranya adalah Bourdour reaction, steam-carbon reaction, water-gas shift reaction, dan CO methanation. Proses reaksi tersebut adalah sebagai berikut

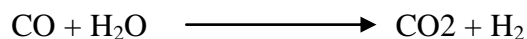
Bourdouar reaction:



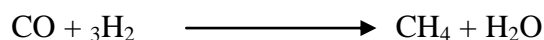
Steam-carbon reaction :



Water-gas shift reaction:

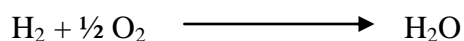
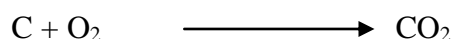


CO methanation :



2.9.4 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 :



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

2.11 Gas Mampu Bakar (*Syngas*)

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

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

Tabel 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>	<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 8. 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
Specific Heat (kJ/Kg.K)	3,46	1,05	2,22

Sumber: Kurniawan, 2012

2.12 Perhitungan Untuk Kerja Reaktor Gasifikasi

2.12.1 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, specific gasification of fuel, jumlah udara yang dibutuhkan dan waktu operasi berlangsung.p

1. Specific Gasification Rate (SGR)

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

$$SGR = \frac{\text{Weight of fuel (kg)}}{\text{Reactor area (m}^2\text{) x operating time (hr)}}$$

Dimana:

$SGR =$ Spesific Gasification rate, kg/m^2 jam

$T =$ Waktu operasi, hr

$Rc. Area =$ Luas reaktor ($2 \pi r t$), m^2

2. Fuel Consumption Rate (FCR)

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

$$FCR = \frac{\text{Weight of fuel used (kg)}}{\text{Operating time (hr)}} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

3. Combustion Zone Rate (CZR)

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

$$CZR = \frac{\text{Length of the reactor (m)}}{\text{operating time (hr)}} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

4. 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 bahan bakar. Ketinggian reaktor dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho \text{ fuel}} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Dimana:

$H =$ Tinggi reaktor, m

$SGR =$ spesific gasification of fuel, $kg/m^2 - hr$

$T =$ waktu, hr

$\rho =$ densitas fuel, kg/m^3

5. Diameter reaktor

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

$$D = \left(\frac{1,27 FCR}{SGR} \right)^{0,5} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Dimana:

$D =$ Diameter reaktor, m

$FCR =$ fuel consumption rate, kg/jam

$SGR = \text{Specific gasification rate of fuel, kg/m}^2 - \text{hr}$

6. 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:

$$T = \frac{\rho \times V_r}{FCR} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Dimana:

T = Waktu yang diperlukan untuk pembakaran bahan bakar, hour

V_r = Volume reaktor ($\prod r^2 t$), m^3

ρ = Densitas bahan bakar, kg/m^3

FCR = Laju pembakaran bahan bakar, kg/hr

7. 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.

$$ER = \frac{\text{fuel-to-oxider-ratio}}{(\text{fuel-to-oxider-ratio})_{\text{stoichiometric}}} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Nilai ekivalen rasio didefinisikan sebagai beriku (Turns, 2002):

$$ER, \emptyset = \frac{\text{Air to fuel ratio}}{(\text{Air to fuel ratio})_{\text{stoichiometric}}} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)}{\left(\frac{A}{F}\right)_s} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

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:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = 8,89 (\%C + 0,375 \times \%S) + 26,5 \times \%H - 3,3 \times \%O \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Dimana:

- % C Karbon dari bahan bakar
- %H Hidrogen dari bahan bakar
- %O Oksigen dari bahan bakar
- %S Sulfur dari bahan bakar

8. 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 sekam padi menjadi gas. Kebutuhan udara dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$AFR = \frac{e \times FCR \times SA}{\rho \text{ air}} \quad \text{Sumber: (Balenio, 2005)}$$

Dimana:

- AFR = laju alir udara, m³/hr
- E = equivalence ration, 0.3 – 0.4
- FCR = laju pembakaran sekam padi, kg/hr
- SA = stokiometri udara sekam padi,
- ρ = densitas udara, kg/m³

Parameter penentuan performa *gasifier* salah satunya dengan mengetahui apakah proses gasifikasi yang terjadi di dalamnya mampu mngkonversikan secara sempurna seluruh energi yang masuk menjadi energi yang berguna. Namun pada kenyataannya pastilah terjadi banyak *losses* yang bisa mengurangi performa dari proses gasifikasi itu sendiri. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan kesetimbangan energi dan massa untuk menganalisis efisiensi sebagai indikaor dari performa gasifier dalam hal ini sebagai responnya terhadap variasi kecepatan suplai udara yang dimasukkan. Energi yang masuk berasal dari dua sumber utama, yaitu pemasukkan biomassa dan blower hisap yang berada di atas filter jerami langsung menuju ke dalam reaktor. Sedangkan energi keluarnya berupa energi yang berasal dari *refuse*, asap cair, dan *syngas* yang merupakan hasil dari

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

2.12.2 Perhitungan Gas Heating Value

$LHV = 10,768[H_2] + 12,696[CO] + 35,866 [CH_4] + 83,800$ Sumber: (Balenio, 2005)

2.12.3 Perhitungan Neraca Massa

a. Menghitung total carbon pada refuse

- Berat Refuse = $\frac{Ash\ bb}{Ash\ pada\ refuse}$ (Sumber: Hougen, pg. 427)

- Rasio VM Combustible pada bb = $\frac{VM\ bb + FC\ carbon\ bb}{VM\ bb}$

(sumber: Hougen, pg. 427)

- VM di refuse = Berat Refuse x % VM di Refuse (Sumber: Hougen, pg. 427)

- Combustible tidak berubah di refuse = VM Refuse x Rasio VM Combustible pada bb (Sumber: Hougen, pg. 427)

- FC di Refuse = Berat Refuse x % FC di Refuse (sumber: Hougen, pg. 427)

- Total Combustible di Refuse = FC Refuse + VM Refuse (Sumber: Hougen, pg. 427)

- Carbon di Refuse = Total Combustible di Refuse – Combustible tidak berubah di Refuse (Sumber: Hougen, pg. 427)

- Total kadar carbon dari combustible bs = $\frac{C\ bb}{VM\ Bb + FC\ Bb}$

(Sumber: Hougen, pg. 427)

- Carbon tidak terbakar di Refuse

= Total kadar carbon dari combustible bb x Combustible tidak berubah di refuse (Sumber: Hougen, pg. 427)

- Total Carbon di Refuse = C di Refuse + C tidak terbakar di Refuse (Sumber: Hougen, pg. 427)

b. Menghitung Berat Flue Gas Kering

Neraca Carbon

- C Terbakar = C di Bb – Total C di Refuse (Sumber: Hougen, pg. 428)
- Mole dari flue gas kering = $\frac{C \text{ Terbakar}}{\text{Total C di Flue Gas}}$ (Sumber: Hougen, pg. 428)

c. Berat dari Udara Suplai

Neraca Nitrogen

- Suplai Udara Kering = $\frac{N_2 \text{ dari udara}}{0,79}$ (Sumber: Hougen, pg. 428)

d. Kadar Hidrogen di Bb

Neraca Oksigen

- O₂ di flue gas kering = mol CO₂ + $\frac{\text{mol CO}}{2}$ + mol O₂ (Sumber: Hougen, pg. 428)
- O₂ masuk dari Udara Kering = Suplai Udara Kering x 0,21 (Sumber: Hougen, pg. 428)
- Abu Koreksi = Abu di Bb – 3/8 (Sulfur di Bb) (Sumber: Hougen, pg. 399)
- Combined H₂O = Berat Bb – (Moisture bb + C bb + S bb + N bb + Abu koreksi) (Sumber: Hougen, pg. 429)

e. Uap Air di Flue Gas

Hidrogen Balance

- Total H₂O = H₂O dari bb + H₂O terbentuk dari H (Sumber: Hougen, pg. 429)
- Mole dari Flue Gas Basah = mol Flue Gas Kering + Total H₂O (Sumber: Hougen, pg. 429)

2.12.4 Perhitungan Neraca Energi

1. Energi Input

- a. Q₁ = Panas Pmbakaran Bb
 - Q Bb = massa bb x HHV bb (Sumber: Hougen, pg. 424)
- b. Q₂ = Panas Sensibel Udara Kering
 - Q Sensibel Udara Kering = mol Udara Kering x Cp x dT
 - Cp = A + B/2 (T₂ + T₁) + C/3 (T₂² + (T₂ x T₁) + T₁²) (Hougen, 1943 pg. 258)

$$A = 6,386 \quad B = 1,762 \times 10^{-3} \quad C = -0,2656 \times 10^{-6}$$

$$dT = (\text{Temperatur Udara Masuk} - \text{Temperatur Referen})$$

2. Energi Output

a. $Q_3 = \text{Panas Sensibel Flue Gas Kering}$

$$- Q_{3.1} \text{ Panas Sensibel CO}_2 = \text{mol CO}_2 \times C_p \times dT$$

$$C_p = A + B/2 (T_2 + T_1) + C/3 (T_2^2 + (T_2 \times T_1) + T_1^2) \quad (\text{Sumber: Hougen, 1943 hal 258})$$

$$A = 6,339 \quad B = 0,01014 \quad C = -0,000003425$$

$$dT = (\text{Temperatur Flue Gas} - \text{Temperatur Referen})$$

Selanjutnya untuk komponen flue gas yang lainnya seperti gas CO, N₂, dan O₂ dilakukan perhitungan yang sama, yang membedakannya adalah nilai dari konstanta A, B, dan C yang dapat dilihat pada buku Hougen halaman 258.

b. $Q_4 = \text{Panas Sensibel Uap Air di Flue Gas}$

$$Q_{4.1} = \text{mol uap air di flue gas} \times \text{panas penguapan} \quad (\text{Sumber: Hougen, pg. 424})$$

$$Q_{4.2} \text{ Superheat} = \text{mol uap air di flue gas} \times C_p \text{ air} \times dT \quad (\text{Sumber: Hougen, pg. 424})$$

c. $Q_5 = \text{Panas Carbon dalam Refuse}$

$$Q_5 = \text{Massa Carbon di Refuse} \times \text{HHV Carbon} \quad (\text{Sumber: Hougen, pg. 424})$$

$$\text{HHV Carbon} = 8139,868 \text{ kkal/kg} \quad (\text{Sumber : Engineer Toolbox})$$

d. $Q_6 = \text{Panas Sensibel Refuse}$

$$Q_6 = \text{Massa Refuse} \times C_p \times Dt \quad (\text{Sumber: Hougen, pg. 424})$$

$$C_p \text{ Refuse} = 0,058 \text{ kkal/kg.K} \quad (\text{Sumber: Hougen, pg. 427})$$

$$dT = (\text{Temperatur Refuse} - \text{Temperatur Referen})$$

e. $Q_7 = \text{Panas Konveksi Reaktor Gasifikasi dari Panas Pembakaran Ampas Tebu}$

$$1. \text{ GrL} = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_{ref}) \times L^3}{\nu^2} \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

$$2. \text{ ReL} = \frac{U \times L}{\nu} \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

$$3. \frac{\text{GrL}}{\text{ReL}^2} = \frac{5059831}{7271809,1} \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

4. Persamaan rumus untuk free convection

$$1) \text{ Ra D} = \frac{g \times \beta \times (T_s - T) \times D^3}{\nu \times \alpha} \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

$$2) \text{ NUD} = \left\{ 0,6 \frac{0,387 \times (Ra D)^{1/6}}{1 + \left[\left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

$$3) \mathbf{Q_7} = \frac{k}{D} \times \text{NU D} \quad (\text{Sumber : Kern, P.203})$$

f. $Q_8 = Q_{\text{input}} - Q_{\text{output}}$ (Sumber: Hougen, pg. 427)

$$Q_{\text{input}} = (Q \text{ Pembakaran BB} + Q \text{ Sensibel Udara Kering})$$

$$Q_{\text{output}} = (Q \text{ Sensibel Flue Gas Kering} + Q \text{ Sensible Uap Air di Flue Gas} + Q \text{ Karbon dalam Refuse} + Q \text{ Sensibel Refuse} + Q \text{ Konveksi})$$

2.12.5 Perhitungan *Specific Fuel Consumed* (SFC)

$$\text{SFC} = \frac{\text{massa bahan bakar}}{\text{Produk}}$$

2.12.6 Perhitungan *Specific Energy Consumed* (SEC)

$$\text{SEC} = \frac{\text{Energi Input}}{\text{Produk}}$$

2.12.7 Perhitungan Efisiensi Konversi Energi

$$\text{Efisiensi Konversi Energi} = \frac{\text{LHV Syngas}}{\text{Energi Ampas Tebu}} \quad (\text{Sumber : Bambang Purwantana, 2009})$$