

BAB II

DASAR TEORI

II.1 PRINSIP DASAR GASIFIKASI BATUBARA

Gasifikasi merupakan salah satu upaya untuk mengkonversikan batubara menjadi bahan bakar gas. Upaya ini telah dikenal sejak 2 abad yang lalu, yaitu pada abad ke 19 sampai pertengahan abad 20 yang dikenal dengan gas kota. Gas yang dihasilkan ini merupakan campuran dari gas hidrogen dan karbon monoksida yang merupakan hasil konversi dari batubara.

Dalam gasifikasi total, batubara bereaksi dengan pereaksi yang berupa udara, oksigen, uap air, karbondioksida atau campuran dari gas-gas tersebut. Bahan-bahan organik dari batubara diubah seluruhnya menjadi produk gas sehingga yang tersisa dalam reaktor adalah abu. Reaksi utama terjadi pada proses gasifikasi yang menggunakan pereaksi udara disebut sebagai pembakaran tak sempurna (*partial combustion*) terhadap batubara.

Produk gas yang terbentuk disebut gas produser yang terutama mengandung gas karbon monoksida dan nitrogen yang memiliki nilai kalor kurang dari 1780 kalori/liter sehingga disebut juga gas berkalori rendah.

Komposisi dari gas yang dihasilkan proses gasifikasi tergantung pada batubara yang digunakan, temperatur operasi, pengaruh dari uap air. Pada temperatur tinggi, gas yang dihasilkan banyak mengandung karbon dioksida, sedangkan pada temperatur rendah banyak dihasilkan gas karbon monoksida. Air (*moisture*) dalam batubara atau uap air yang ditambahkan ke dalam reaktor dapat meningkatkan proporsi hidrogen dan karbon monoksida dalam produk gas dan selanjutnya menaikkan nilai kalor gas. Bila dipergunakan air atau uap air berlebih maka temperatur proses akan turun dan terbentuk lebih banyak karbon dioksida sehingga nilai kalor turun [14].

II.1.1 Reaksi Dasar Gasifikasi

Reaksi–reaksi dasar dari proses gasifikasi batubara, sangat terkait erat dengan kadar karbon yang terdapat dalam batubara tersebut. Sesuai dengan jenis dari batubara yang ada, maka terdapat pula unsur H, O, N, dan S dalam presentase tertentu. Beberapa reaksi–reaksi dasar dari gasifikasi sesuai dengan pereaksi yang diberikan, diantaranya [15] :

- Gasifikasi dengan oksigen dan udara (pembakaran parsial),
$$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO} \qquad \qquad \qquad \text{H} = -123 \text{ kJ/mol}$$
- Gasifikasi dengan karbon dioksida (reaksi Boudouard),
$$\text{C} + \text{CO}_2 \longrightarrow 2\text{CO} \qquad \qquad \qquad \text{H} = 160 \text{ kJ/mol}$$
- Gasifikasi dengan uap (reaksi gas – air),
$$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + \text{H}_2 \qquad \qquad \qquad \text{H} = 119 \text{ kJ/mol}$$

Pada umumnya panas diperlukan untuk memperoleh reaksi gasifikasi secara menyeluruh, dan ini biasanya disediakan melalui reaksi pembakaran :

- $$\text{C} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 \qquad \qquad \qquad \text{H} = -406 \text{ kJ/mol}$$
- Reaksi – reaksi lainnya yang penting dari proses gasifikasi adalah sebagai berikut :

- Reaksi pergeseran gas – air,
$$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 \qquad \qquad \qquad \text{H} = -41 \text{ kJ/mol}$$
- Methanasi,
$$\text{CO} + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \qquad \qquad \qquad \text{H} = -206 \text{ kJ/mol}$$
- Hidrogasifikasi,
$$\text{C} + 2\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 \qquad \qquad \qquad \text{H} = -87,4 \text{ kJ/mol}$$

Reaksi – reaksi di atas berkaitan dengan energi reaksi dan stoikiometri, tetapi sesungguhnya akan tergantung juga dari jumlah pereaksi dan produknya, kondisi suhu, tekanan, dan lamanya reaksi.

II.1.2 Jenis Proses Gasifikasi Dilihat Dari Segi *Gasifier*

Proses gasifikasi batubara dapat diklasifikasikan beberapa kriteria :

- Suhu dan tekanan operasinya,
- Gas – gas pereaksinya (reaktan),
- Gas – gas produk
- Pengaturan secara fisik bahan – bahan reaksi,
- Reaksi kinetik,
- Alamiah dari abu yang keluar.

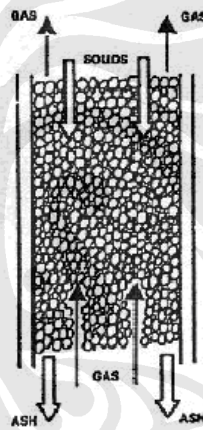
Secara umum proses–proses tersebut dapat digolongkan menjadi empat jenis proses gasifikasi, tergantung bagaimana batubara dapat dikontakkan dengan uap dan oksigen atau pengontakkan bahan baku dengan medium penggasifikasi. Untuk melangsungkan gasifikasi, diperlukan suatu reaktor gasifikasi disebut *gasifier*. Empat jenis *gasifier* [16, 17], yaitu *fixed bed*, *fluidized bed*, *entrained bed gasifier*, dan *molten iron bed*. Masing-masing *gasifier* memiliki karakteristik yang berbeda serta keuntungan dan kelemahan. Dari masing–masing *gasifier* timbulah beberapa jenis proses gasifikasi. Berikut merupakan jenis proses gasifikasi dilihat dari jenis *gasifier*.

II.1.2.1 *Fixed Bed Gasifier*

Gasifier jenis ini merupakan reaktor gasifikasi unggun tetap berbentuk vertikal. *Gasifier* jenis ini digunakan untuk mempertahankan aliran padatan dengan kecepatan gas rendah. Aliran bahan bakar *gasifier* jenis ini adalah *counter current*, bahan bakar dimasukkan dari bagian atas *gasifier* dan gas (*steam* dan oksigen atau udara) dimasukkan dari bagian bawah *gasifier*. Aliran *counter current* tersebut dapat dilihat pada gambar 2.1. Kriteria bahan bakar yang dapat diolah *gasifier* jenis ini adalah berupa padatan dengan ukuran 5 – 55 mm. Bahan bakar yang akan diolah ditumpuk di dalam reaktor dan disangga dengan *grate*. Bahan bakar tersebut akan dipanaskan dan dikeringkan oleh gas produser hasil gasifikasi yang akan keluar dari *gasifier*. Penggasifikasian bahan bakar tersebut akan menghasilkan abu dan gas produser beserta produk samping (residu) berupa tar. Abu (kerak atau *molten slag*) dan tar diambil dari bagian bawah *gasifier* sedangkan gas produser yang dihasilkan diambil pada bagian atas *gasifier*. Gas

produser yang dihasilkan dari *fixed bed gasifier* mengandung kadar tar yang tinggi.

Ciri khas *gasifier* ini adalah perbedaan temperatur pada berbagai tempat di dalam *gasifier* dan beroperasi pada tekanan tinggi. Temperatur maksimum yang dapat dicapai pada *gasifier* jenis ini adalah 930 – 1430 °C. Suhu keluaran yang dihasilkan dari *gasifier* ini berkisar antara 315 – 550 °C dengan *residence time* 1 – 2 jam (Donald, 1998). Karakteristik dari *gasifier* jenis ini adalah rendahnya temperatur gasifikasi dan gas hasil gasifikasi sehingga membutuhkan oksigen yang rendah, serta menghasilkan kandungan metan yang tinggi. *Gasifier* jenis ini sangat mudah dibuat dan dioperasikan, tetapi mahal untuk ukuran kapasitas yang relatif kecil.



Gambar 2.1 Fixed bed Gasifier

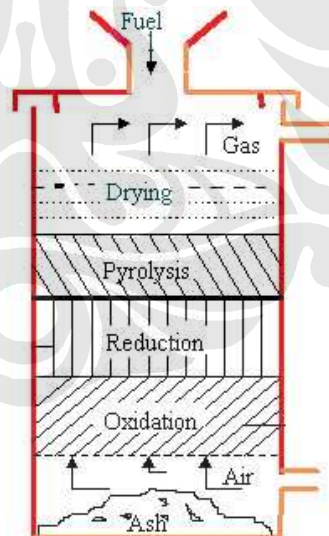
Berdasarkan aliran udara yang dipasok ke dalam kolom bahan bakar, *fixed bed gasifier* dibagi menjadi empat jenis [18], yaitu *updraft gasifier*, *downdraft gasifier*, *twin-fire gasifier*, dan *crossdraft gasifier*.

Updraft Gasifier

Pada *gasifier* jenis ini, udara masuk melalui bagian bawah *gasifier* melalui *grate*. Aliran udara ini berlawanan arah (*counter current*) dengan aliran bahan bakar yang masuk dari bagian atas *gasifier*. Gas produser yang dihasilkan keluar melalui bagian atas *gasifier* sedangkan abu diambil pada bagian bawah *gasifier*. Reaksi pembakaran pada *gasifier* ini terjadi di dekat *grate* kemudian diikuti reaksi reduksi (proses gasifikasi). Reaksi reduksi tersebut akan menghasilkan gas bertemperatur tinggi. Gas hasil reaksi (gas produser) tersebut bergerak ke bagian atas *gasifier* menembus unggun bahan bakar menuju daerah yang bertemperatur

lebih rendah. Pada saat menembus unggun bahan bakar, gas produser akan kontak dengan bahan bakar yang turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pertukaran panas antara gas dan bahan bakar. Panas *sensible* yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Proses pirolisis dan pengeringan tersebut terjadi pada bagian teratas *gasifier*. Updraft *gasifier* mencapai efisiensi tertinggi ketika gas panas yang dihasilkan meninggalkan *gasifier* pada temperatur rendah. Gambaran tahap-tahap yang terjadi pada *updraft gasifier* dapat dilihat pada gambar 2.2.

Updraft gasifier memiliki kekurangan dan kelebihan. Kekurangan yang dimiliki *updraft gasifier* adalah tingginya jumlah uap tar yang terkandung di dalam gas keluaran dan kemampuan gas produser membawa muatan rendah. Selain itu ada kemungkinan terjadi *channeling*, sehingga distribusi panas tidak merata dan dapat menurunkan efisiensi *gasifier*. Sedangkan keuntungan pemakaian *updraft gasifier* adalah mekanismenya sederhana, arang (*charcoal*) habis terbakar, suhu keluaran rendah, dan efisiensi tinggi.



Gambar 2.2 *Updraft Gasifier*

Downdraft Gasifier

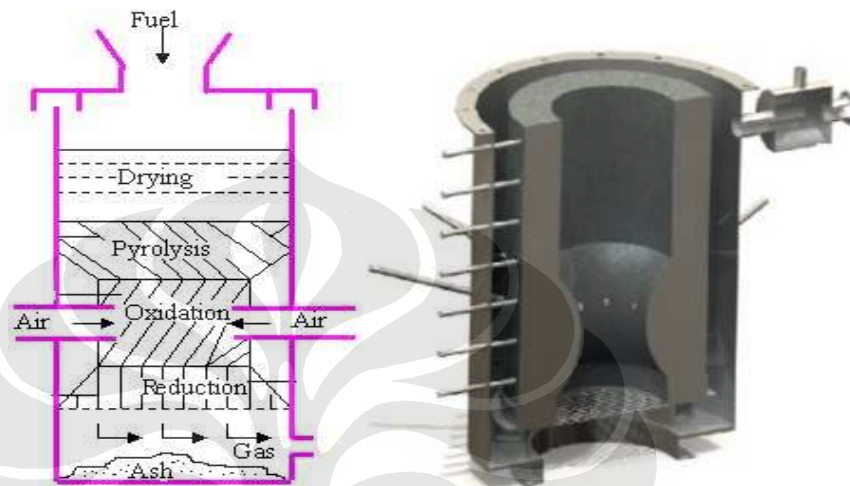
Downdraft gasifier dirancang untuk membatasi kandungan minyak dan tar yang terbawa bersama gas produser. Pada *downdraft gasifier*, udara dimasukkan ke dalam aliran bahan bakar padat (*packed bed*) pada atau di atas zona oksidasi. Aliran udara ini searah (*co-current*) dengan aliran bahan bakar yang masuk ke

dalam *gasifier*. Bahan bakar dimasukkan pada bagian atas *gasifier*. Bahan bakar tersebut akan mengalami proses pengeringan dan pirolisis akibat panas yang dihasilkan pada reaksi oksidasi. Pada tahap pirolisis bahan bakar, dihasilkan uap dan tar. Uap dan tar yang dihasilkan tersebut akan melalui unggun arang panas dan mengalami perengkahan menjadi gas yang lebih sederhana atau arang. Perengkahan ini menghasilkan pembakaran stabil yang menjaga temperatur pada 800 – 1000 °C. Jika temperatur naik (melebihi rentang temperatur tersebut) maka reaksi endotermik akan mendominasi dan mendinginkan gas, dan jika temperatur turun (kurang dari rentang temperatur tersebut) maka reaksi eksotermik akan mendominasi dan menjaga gas agar tetap panas. Tahap selanjutnya adalah reaksi reduksi. Reaksi reduksi terjadi pada zona dekat dengan *grate*. Pada tahap ini, gas produser dihasilkan. Gas produser yang dihasilkan akan tertarik keluar menuju bagian bawah *gasifier*. Gambaran tahap-tahap yang terjadi pada *downdraft gasifier* dapat dilihat pada gambar 2.3.

Sama halnya dengan *updraft gasifier*, *downdraft gasifier* juga memiliki kekurangan dan kelebihan. Kekurangan yang dimiliki *gasifier* jenis ini adalah rendahnya efisiensi keseluruhan akibat rendahnya pertukaran panas dalam sistem dan kesulitan dalam menangani kelembaban dan kadar abu yang tinggi. Sedangkan kelebihan menggunakan *gasifier* jenis ini antara lain adanya kemungkinan menghasilkan gas bebas tar sehingga masalah lingkungan yang ditimbulkan lebih kecil daripada *updraft gasifier*, perolehan tar dan minyak yang dihasilkan pada *downdraft gasifier* lebih kecil 10% terhadap perolehan tar dan minyak yang dihasilkan pada *updraft gasifier*, waktu yang dibutuhkan untuk penyalaan bahan bakar dan pengoperasian sistem pada kondisi optimal sekitar 20 – 30 menit. Waktu tersebut lebih singkat jika dibandingkan dengan waktu yang dibutuhkan oleh *updraft gasifier*.

Gasifer Unggun Tetap Aliran Kebawah (*downdraft gasifier*) menghasilkan gas produser relatif bersih dengan kandungan tar dan partikel yang kecil sehingga sangat sesuai untuk mesin pembakaran dalam, ketel dan turbin (**Robert Manurung, 1981**). Sedangkan **M.S Roa** menegaskan *fixed bed* tipe ini merupakan jenis *gasifier* yang sederhana, memiliki nilai *realible* tinggi, dan memungkinkan berbagai *feedstock* dengan partikel rendah pada gas produser.

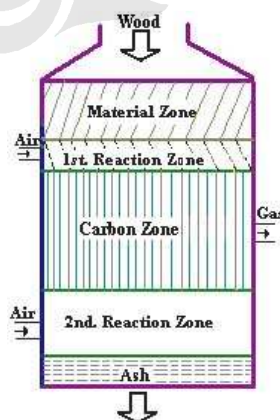
Selain itu juga berefisiensi tinggi. Atas dasar itu pengoperasian skala laboratorium gasifikasi di Departemen Teknik Mesin FTUI menggunakan jenis *gasifier downdraft fixed bed*.



Gambar 2.3 *Downdraft Gasifier*

Twin-fire Gasifier

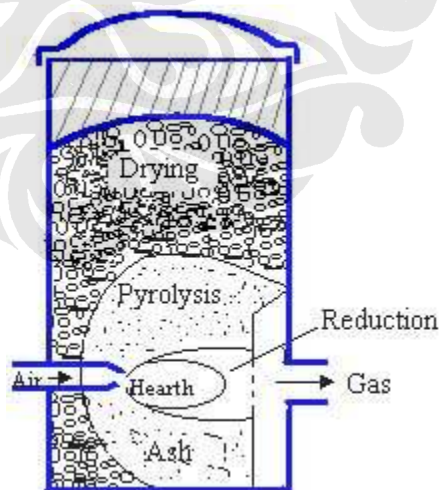
Twin-fire Gasifier memiliki dari dua zona reaksi. Pada zona yang pertama terjadi proses pengeringan, karbonisasi pada temperatur rendah, dan perengkahan gas. Sedangkan pada zona kedua terjadi proses gasifikasi arang secara permanen. Temperatur gas berkisar antara 460 – 520 °C. *Twin-fire gasifier* memproduksi gas bersih yang cukup baik.



Gambar 2.4 *Twin-fire gasifier*

Crossdraft Gasifier

Crossdraft gasifier merupakan jenis *gasifier* yang khusus dirancang untuk arang (*charcoal*). *Gasifier* ini tidak ideal. *Gasifier* jenis ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah: proses hanya ditujukan untuk arang kualitas tinggi, temperatur gas keluaran *gasifier* tinggi, CO₂ yang tereduksi rendah, dan kecepatan gas tinggi. Hal ini disebabkan oleh design *crossdraft gasifier* yang penempatan penyimpanan abu, zona pembakaran dan pereduksiannya terpisah. Karakteristik design seperti ini menyebabkan jenis bahan bakar yang dapat digunakan terbatas hanya pada bahan bakar yang berkadar abu sedikit, seperti kayu, arang, dan batu karang. Berdasarkan *concentrated partial zones* yang beroperasi pada temperatur lebih besar daripada 2000 °C kemampuan muatan *crossdraft gasifier* cukup baik. Waktu yang dibutuhkan untuk *start up* lebih singkat daripada *gasifier* jenis *downdraft* dan *updraft*, yaitu sekitar 5 – 10 menit. Temperatur tinggi pada *gasifier* ini memiliki efek yang nyata terhadap komposisi gas. *Gasifier* jenis ini akan beroperasi dengan baik pada aliran udara dan bahan bakar yang kering. *Gasifier* ini cocok untuk dioperasikan pada skala kecil.



Gambar 2.5 *Crossdraft Gasifier*

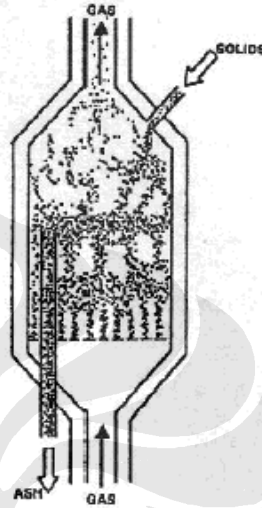
II.1.2.2 Fluidized Bed Gasifier

Gasifier jenis ini menggunakan unggun yang terdiri dari inert (pasir atau arang (*char*) atau kombinasi keduanya). Inert yang digunakan berfungsi sebagai pengatur panas agar temperatur operasi tetap. Pada *gasifier* jenis ini, bahan bakar yang digunakan berupa padatan yang berukuran kurang dari 8 mesh (0.5 – 5 mm). Bahan baku tersebut dimasukkan pada bagian atas unggun atau langsung pada unggun kemudian dialirkan dengan bantuan gas sehingga bergerak seperti fluida dan membentuk unggun fluidisasi. Pencampuran bahan bakar dan cepatnya perpindahan panas pada bahan bakar akibat fluidisasi menyebabkan temperatur di dalam *gasifier* seragam. Gas (campuran steam dan oksigen atau udara) yang digunakan dialirkan dari bawah bagian bawah unggun. Laju aliran gas yang digunakan sekitar 1 – 2 ft/s. Hal ini dimaksudkan untuk menjaga kondisi unggun agar selalu terfluidisasi. Sedangkan abu yang dihasilkan diambil dari bagian bawah *gasifier* dan didinginkan oleh umpan gas masuk.

Sebelum bahan bakar dimasukkan ke dalam *gasifier*, unggun dipanaskan dengan pemanasan luar hingga mencapai suhu sekitar 500 °C. Suhu keluaran dari *gasifier* ini berkisar antara 700 – 900 °C. *Residence time gasifier* jenis ini berkisar antara 5 – 50 detik dan beroperasi pada suhu konstan, yaitu 760 – 1040 °C. Suhu tinggi tersebut dimaksudkan untuk mencegah terjadinya aglomerasi dan pembentukan kerak. *Gasifier* jenis ini mudah dibuat, tetapi pengoperasiannya memerlukan pengendalian yang cermat, terutama pengaturan laju alir udara dan kebutuhan oksigen dalam proses gasifikasi.

Fluidized bed gasifier memiliki beberapa kelebihan, antara lain : kemampuan memproses bahan bakar yang memiliki kandungan abu tinggi (bahan bakar kualitas rendah), khususnya abu dengan titik lebur tinggi, kontak antara padatan dan gas sangat baik (efisien), luas permukaan lebih besar sehingga reaksi berlangsung dengan cepat, temperatur dapat dikontrol dengan perbandingan antara udara dan bahan bakar sehingga kondisi operasi mudah diubah-ubah.

Sedangkan kekurangan yang dimiliki *fluidized bed gasifier* antara lain: gas yang dihasilkan mengandung tar yang tinggi ($> 5 \text{ mg/m}^3$) dan tidak cocok untuk umpan dalam wujud cair. Berikut ini gambaran *fluidized bed gasifier*.



Gambar 2.6 *Fluidized Bed Gasifier*

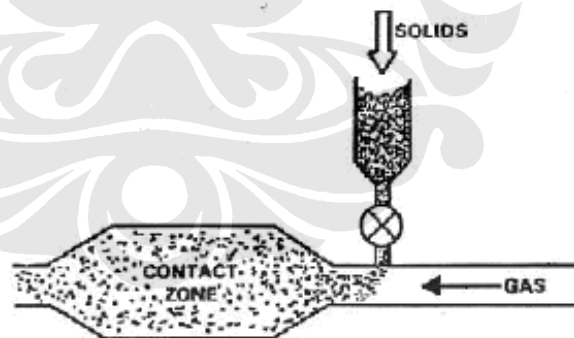
II.1.2.3 *Entrained Bed Gasifier*

Entrained bed gasifier merupakan bejana horisontal yang beroperasi pada tekanan atmosfer atau sedikit lebih tinggi dari tekanan atmosferik. Pengoperasian pada tekanan tinggi menyebabkan kandungan tar dan minyak dalam gas hasil produksi sedikit atau tidak ada sama sekali. *Gasifier* jenis ini dapat dioperasikan pada temperatur rendah untuk menjaga abu agar tetap dalam keadaan padatan kering atau juga dapat dioperasikan pada temperatur di atas titik lebur abu sehingga abu yang dihasilkan berbentuk lelehan cair.

Bahan baku yang digunakan sebagai bahan bakar *entrained bed gasifier* harus berukuran sangat kecil ($< 0.1 \text{ mm}$) dan homogen. Bahan bakar tersebut dimasukkan ke dalam *gasifier* secara bersamaan dengan medium penggasifikasi (oksigen dan steam) dengan kondisi tertentu sehingga terbentuk partikel-partikel. Bahan bakar dan medium gasifikasi tersebut mengalir searah (*co-current*). Medium penggasifikasi dimasukkan dengan laju yang tinggi. Ukuran bahan yang lolos sekitar 80% pada ukuran kurang dari 200 mesh ($44 \mu\text{m}$). *Gasifier* ini memiliki residence time 1 – 10 detik. Temperatur operasi pada *gasifier* ini tinggi, lebih besar dari $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, dan seragam di seluruh bagian *gasifier*. Hal ini bertujuan

agar gas produser yang diperoleh lebih banyak serta tar dan metana yang dihasilkan tidak terikut pada gas produser. Abu diambil sebagai slag. Hal ini disebabkan oleh temperatur operasi lebih besar daripada suhu peleburan abu. Temperatur keluaran produk pada *gasifier* jenis ini sekitar 900 – 1400 °C. Kontrol pada *gasifier* jenis ini adalah laju alir bahan bakar, oksigen, dan kukus. Efisiensi *gasifier* ditentukan oleh temperatur operasi, ukuran partikel, dan laju injeksi kukus.

Entrained bed gasifier memiliki beberapa kelebihan, antara lain tidak terlalu memperhatikan karakteristik bahan baku, sesuai untuk bahan baku yang berukuran kecil, gas produser mengandung sedikit tar, abu diambil dalam bentuk slag, produk dengan suhu tinggi memerlukan *quenching* untuk pembersihan, pendinginan dapat dilakukan dengan cara pertukaran panas (*reuse*) sehingga panas yang dihasilkan lebih efisien. Selain itu, *entrained bed gasifier* juga memiliki kekurangan, antara lain oksigen yang dibutuhkan lebih banyak dan bahan baku yang berukuran besar memerlukan pengolahan awal agar dapat memenuhi spesifikasi umpan *gasifier* jenis ini dan pengoperasian *gasifier* jenis ini sangat rumit. Berikut ini gambar dari *entrained bed gasifier*.



Gambar 2.7 *Entrained Bed Gasifier*

II.2 BAHAN BAKAR BATUBARA

II.2.1 Proses Pembentukan Batubara

Batubara merupakan bahan organik yang berasal dari tumbuh-tumbuhan mati, terbentuk melalui proses yang kompleks, membutuhkan waktu sangat lama (puluhan hingga ratusan juta tahun), serta dipengaruhi oleh berbagai faktor meliputi fisika, kimia, dan geologi [12]. Definisi lain mengatakan batubara adalah

substansi heterogen yang dapat terbakar dan terbutuk dari banyak komponen yang mempunyai sifat saling berbeda. Batubara dapat dikatakan batuan sedimen yang terbentuk dari dekomposisi tumpukan tanaman selama kira-kira 300 juta tahun (Teknologi Pembakaran Batubara). Pembentukan batubara sangat dipengaruhi oleh lokasi ditemukan. Bisa jadi, lokasi tersebut berupa lingkungan / daerah berawa dangkal. Kondisi demikian banyak terdapat pada cekungan sedimen yang terbentuk sepanjang tepi pantai, delta, dan danau – danau. Saat ini terdapat dua teori mengenai tempat pembentukan batubara yaitu:

1. Teori Insitu

Teori ini mengatakan bahwa bahan – bahan pembentuk batubara terbentuknya di tempat di mana tumbuhan itu berada. Tanaman pembentuk yang telah mati akan segera tertutup oleh lapisan sedimen dan mengalami proses *coalification* (pembatubaraan). Dengan demikian penyebaran batubara akan laus dan merata serta kadar abunya relatif kecil karena tidak sempat mengalami proses transportasi.

2. Teori Drift

Teori ini mengatakan bahwa bahan – bahan pembentuk batubara tidak berasal dari tempat di mana tumbuhan itu hidup. Tumbuhan pembentuk yang telah mati akan terbawa oleh air dan berakumulasi di suatu tempat, lalu tertutup lapisan sedimen dan mengalami proses *coalification*. Dengan demikian penyebarannya tidak luas namun terdapat di beberapa tempat, sedangkan kualitasnya kurang baik karena banyak mengandung kotoran yang terbawa selama proses transportasinya.

Setelah tumbuhan – tumbuhan pembentuk tadi mati, lalu berakumulasi maka terjadilah proses pembentukan batubara melalui dua tahapan, yaitu :

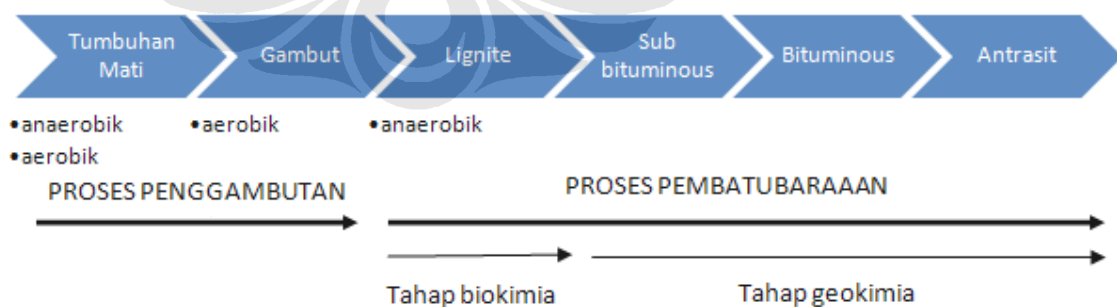
1. Proses *humification / peatification* (humifikasi / penggabungan)

Pada daerah yang berkondisi basah, tumbuhan – tumbuhan mati tersebut akan mengalami dekomposisi dan pembusukan akibat adanya aktivitas berbagai organisme. Organisme yang berperan paling awal adalah organisme aerobik seperti jamur, serangga, dan bakteri aerobik, lalu bila tumbuhan mati tersebut tertimbun sehingga organisme aerobik tidak dapat lagi bekerja, maka organisme anaerobik mulai berperan sehingga akan terjadi proses perubahan menjadi

gambut. Gambut merupakan tahapan sebelum terbentuknya batubara. Proses penggambutan sebenarnya merupakan proses biokimia yang meliputi hidrolisis, oksidasi, dan reduksi oleh adanya bakteri dan jamur. Proses ini dimulai dengan teroksidasinya tumbuhan mati oleh organisme aerobik. Lalu unsur – unsur hidrokarbon yang terdapat pada tumbuhan mati tersebut akan terekstraksi sehingga akan tersisa suatu zat / substansi yang memiliki kandungan karbon dan oksigen yang tinggi. Sementara itu terbentuknya berbagai unsur humat pada substansi tadi sehingga terbentuklah gambut. Unsur huan memiliki sifat asam. Beberapa faktor yang mempengaruhi proses perubahan tumbuhan mati hingga menjadi gambut (dan akhirnya batubara seperti asal dan komposisi tumbuhan pembentuk, iklim, dan lokasi / posisi pembentukan.

2. Proses *coalification* (pembatubaraan)

Proses pembatubaraan dimulai setelah gambut telah terbentuk tertimbun oleh lapisan – lapisan sedimen. Proses ini terbagi menjadi dua tahapan, yaitu tahapan biokimia dan geokimia. Tahap biokimia, organisme anaerobik seperti bakteri dan jamur yang berperan selama proses umifikasi, masih berperan badi proses *coalification*. Tahap ini berakhir bila tebalnya timbunan pada lapisan pembentuk batubara tidak memungkinkan lagi bagi bakteri dan jamur untuk hidup, dan biasanya batubara telah mencapai level *sub-bituminus*.



Gambar 2.8 Skema Pembentukan Batubara

Seiring dengan berjalannya waktu (hingga ratusan juta tahun), melalui proses tersebut maka akan terbentuk batubara muda (*lignite*) kemudian *bituminus* dan berubah menjadi batubara tua (*antrasit*). Pada gambar 2.8 dijelaskan skema pembentukan batubara.

II.2.2 Kualitas dan Klasifikasi Batubara

Sementara itu **Fariz Tirasonjaya** mengatakan faktor fisika, kimia, dan geologi itulah yang akan menentukan kualitas batubara serta kualitas pembakaran. Kualitas batubara ditentukan dengan sifat yang terkandung di dalamnya [19].

Dasar pengklasifikasian batubara antara lain unsur geologi, kandungan petrografis (analisa komponen organik dan anorganik), sifatnya terhadap pelarut atau bahan kimia tertentu, kemampuan teroksidasi, dan kombinasi dari lainnya.

Pengklasifikasian batubara yang umum adalah menurut rangking yaitu derajat metamorfosa / coalifikasi, dalam seri lignit sampai antrasit berdasarkan analisa proksimat, analisa ultimat dan nilai kalornya. Terdapat beberapa sistem klasifikasi batubara, antara lain *America Society of Testing and Materials (ASTM)*, *The National Coal Board of The United Kingdom*, *International Organization for Standardization (ISO)*, *The German DIN*, *Japan Industrial Standard (JIS)* dan lainnya.

Dasar klasifikasi diperoleh dari nilai kalor batubara lembab dan bebas bahan mineral (moist, *mineral matter free*), dasar kandungan karbon tetap serta zat terbang kering dan bebas bahan mineral (dmmf, *dry and mineral matter free*). Untuk batubara rangking rendah tidak diklasifikasikan menurut karbon tetap dan zat terbangnya, tetapi didasarkan nilai kalorinya. Sementara itu, sifat agglomerasi dipakai untuk membedakan rangking batubara yang berada di antara batas kelas. Batubara disebut teragglomerasi bila sisa bongkah kokas yang terbentuk dapat menahan beban seberat 500 gram atau jika bongkah mengembang dan membentuk pori.

Dapat diketahui garis besar klasifikasi batubara dalam lima kelas besar, yaitu gambut, lignit, sub-bituminus, bituminus, dan antrasit. Gambut merupakan tahapan awal pembentukan batubara. Dari gambut belum banyak yang bisa digunakan menjadi bahan bakar bernilai ekonomis dikarenakan kandungan air sangat tinggi dan nilai kalor rendah. Lignit berasal dari kata bahasa latin yang berarti kayu. Lignit atau *brown coal* termasuk rangking terendah batubara ini mempunyai kandungan air, abu, dan zat terbang (*volatile matter*) yang tinggi, tetapi mempunyai nilai kalori terendah. Karena kandungan zat terbangnya yang

tinggi, lignit sangat mudah terbakar dan dikenal sebagai jenis batubara yang mudah terjadi pembakaran spontan, terutama pada penimbunan batubara/*stockpile*. Untuk kandungan sulfur, lignit tergolong banyak.

Sub-bituminus merupakan rangking batubara menengah. Tekstur kayu sudah terlihat pada jenis batubara ini, terlihat dari warna hitam mengkilat dan agak rapuh. Sub-bituminus memiliki nilai kalor cukup tinggi juga kandungan karbon yang relatif tinggi. Di samping itu, kandungan air, abu, dan zat terbangnya juga tinggi. Tidak berbeda jauh dari lignit, sub-bituminus juga tergolong jenis batubara yang memiliki kandungan sulfur cukup tinggi dan mudah terjadi pembakaran spontan.

Penamaan bituminus diperoleh dari kenyataan batubara ini bila dipanaskan akan memiliki massa kohesif, mengikat, dan melekat. Rangking batubara ini paling banyak digunakan pada pembangkit listrik batubara karena memiliki nilai kalor tertinggi dan temperatur nyala tinggi. Selain itu kandungan air, abu, sulfur, dan zat terbang tergolong sedikit. Batubara ini berwarna hitam kilap dan menunjukkan agglomerasi, sehingga cocok sebagai bahan baku pembuatan kokas industri besi baja.

Sedangkan umur batubara paling tua adalah antrasit. Jenis batubara ini merupakan rangking batubara paling tinggi. Warnanya hitam mengkilat, keras dan kompak, tidak rapuh, namun sangat getas dan homogen. Nilai kalor dan kandungan karbon antrasit sangat tinggi. Kandungan air, abu, zat terbang, dan sulfur sangat sedikit.

Tabel 2.1 Persentase Oksigen, Air, dan Abu Pada Bahan Bakar Padat [12]

Bahan bakar	Oksigen (kering, bebas abu)	Uap / moisture (bebas abu)	Abu (kering)
Kayu	45 %	15 – 50 %	0.1 – 10 %
Gambut	35 %	90 %	0.1 – 10 %
Lignit	25 %	30 %	> 5 %
Bituminous	5 %	5 %	> 5 %
Antrasit	2 %	4 %	> 5 %
Refuse-derived fuel	40 %	24 %	10 – 15 %

Tabel 2.2 Perbandingan Antara Bahan Bakar Fosil Dengan Biomassa [12]

Bahan bakar padat	Volatiles (% wt)	Moisture (% wt)	Carbon fix (% wt)	Ash (% wt)	Fuel Ratio	HHV MJ/kg
Batubara (bituminus)	30	5	45	20	-	26
Gambut	65	7	20	8	1.5	22
Kayu	85	6	8	1	0.3	19
Kertas	75	4	11	10	0.1	13

Tabel 2.3 Perbandingan Antara Bahan Bakar Fosil Dengan Biomassa [12]

Bahan bakar Padat	C (% wt)	H (% wt)	N (% wt)	O (% wt)	S (% wt)	Cl (% wt)
Batubara (bituminus)	≈ 60 – 80	≈ 3 – 5	≈ 1 – 2	≈ 10	≈ 1 – 5	≈ 0.01 – 0.1
Batubara (lignit)	≈ 50 – 60	≈ 5	≈ 1 – 2	≈ 20 – 30	≈ 1 – 4	≈ 0.01 – 0.1
Gambut	≈ 50	≈ 6	≈ 2	≈ 40	≈ 0.5	≈ 0.01
Kayu	≈ 40 – 50	≈ 6	≈ 0.2	≈ 45	≈ 0.1	≈ 0.01
Kertas	≈ 35	≈ 5	≈ 0.1	≈ 45	≈ 0.01	≈ 0.01

II.3 PRODUK GASIFIKASI

Produk gas dari proses gasifikasi mempunyai komposisi yang bervariasi tergantung dari proses yang dipakai. Untuk dapat digunakan dalam proses industri gas produser yang keluar dari reaktor gasifikasi harus terlebih dahulu dibersihkan dari polutan. Polutan yang dapat muncul seperti zat-zat terbang dan sulfur.

Tabel 2.4 Pembagian Gas Hasil Reaksi Berdasarkan Kegunaannya [12]

Hasil Gasifikasi	Gas Bermanfaat	Perlu Dihilangkan sebelum Operasi Sintesa	Gas Buang (<i>Inherent diluent</i>)
Gas yang dihasilkan	CO, H ₂ , CH ₄	H ₂ S, NH ₃	CO ₂ , H ₂ O, N ₂

Tabel 2.5 Komposisi Gas dari Berbagai Teknologi Gasifikasi Batubara [12]

Proses	Komposisi Gas produser						
	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	H ₂ S	H ₂ /CO
Lurgi (Lurgi Mineraloltechnik GmbH)	9.2	20.1	14.7	50.2	4.7	0.3	2.2
Koppers-Totzek (Heinrich Koppers GmbH)	50.4	33.1	5.6	9.6	0	0.3	0.66
Winkler (Davy Powergas Inc)	25.7	32.2	15.8	23.1	2.4	0.3	1.3
Synthane (U.S. Bureau of Mines)	10.5	17.5	18.2	37.1	15.4	0.3	1.7
Bi-Gas (Bitumious Coal Research Inc)	22.9	12.7	7.3	48	8.1	0.7	0.55
CO ₂ Acceptor (Consolidation Coal Co.)	14.1	44.6	5.5	17.1	17.3	0.03	3.2
HYGAS: steam oxygen (Institute of Gas Technology)	18	22.8	18.5	24.4	14.1	0.9	1.3
HYGAS: steam-iron (Institute of Gas Technology)	7.4	22.5	7.1	32.9	26.2	1.5	3
IGCC (Brown Coal :Morwell)	15	13.5	9	25	2.2	-	0.9

II.3.1 Klasifikasi Gas Produser

Terdapat beberapa perbedaan jenis aplikasi gas produser saat ini [20]. Klasifikasi berdasarkan cakupan gasifikasi tersebut: (1) menggunakan *grate* atau tidak; (2) metode pencampuran udara; (3) metode pengoperasian; (4) metode pemasukan bahan bakar; (5) pengaturan distribusi gas produser; (6) perlakuan pembuangan *ash*.

II.4 ASPEK TERMODINAMIKA

Kestimbangan energi pada proses pembakaran merupakan penerapan dari hukum I Thermodinamika. Skematiknya dapat di gambar 2.9. Dimana perubahan energi kinetik dan energi potensial dapat diabaikan maka kestimbangan energi dari reaksi pembakaran dapat dinyatakan dengan :

$$Q - W = \Delta H \quad (2.1)$$

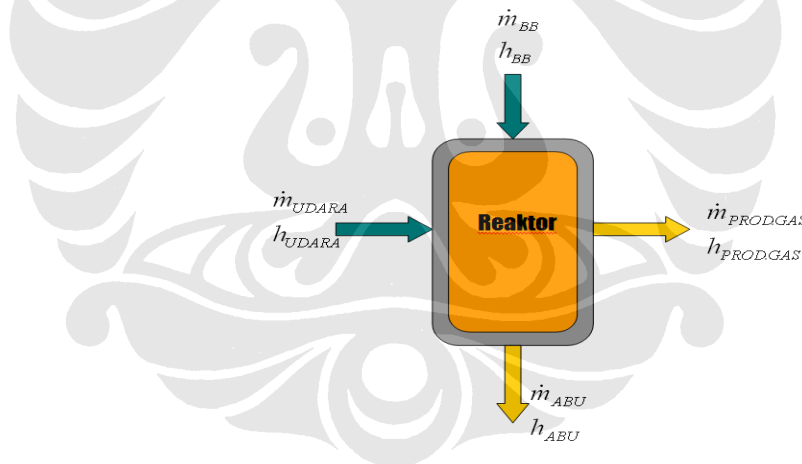
Pada proses gasifikasi, dimana sistem yang menjadi tinjauan utama berupa reaktor, maka kesetimbangan energi pada sistem gasifikasi dapat dinyatakan dengan :

$$Q - W = H_{OUT} - H_{IN} \quad (2.2)$$

Dimana :

H_{IN} = enthalpy untuk udara dan bahan bakar yang masuk ke dalam sistem.

H_{OUT} = enthalpy untuk gas produser dan abu.



Gambar 2.9 Kestimbangan Energi Pada Sistem Gasifikasi [21]

Karena proses gasifikasi merupakan proses endotermik, maka dapat dianggap sistem bersifat adiabatik, sehingga persamaan kesetimbangan energi menjadi :

$$\Delta H_{IN} = \Delta H_{OUT} \quad (2.3)$$

Nilai h_{in} dan h_{out} untuk tiap unit massanya adalah :

$$h_{in} = h_{out} = \sum \frac{N_i}{Mr_i} (\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{ref}) \quad (2.4)$$