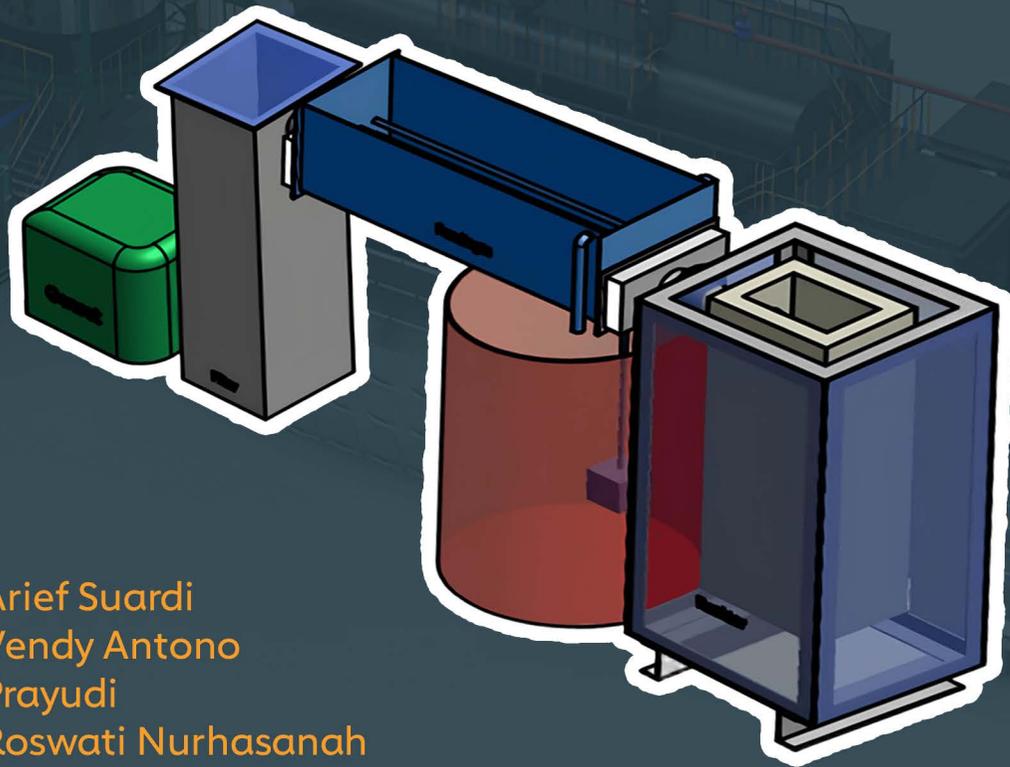


# Monograf

## Perancangan Gasifier Untuk Pembangkit Listrik Skala Kerakyatan



Arief Suardi  
Vendy Antono  
Prayudi  
Roswati Nurhasanah

# **Monograf**

Perancangan Gasifier Untuk  
Pembangkit Listrik Skala Kerakyatan

# Monograf

## Perancangan Gasifier Untuk Pembangkit Listrik Skala Kerakyatan

Arief Suardi  
Vendy Antono  
Prayudi  
Roswati Nurhasanah



**Penerbit :**

**INSTITUT TEKNOLOGI PLN**

**2024**

## **MONOGRAF**

# Perancangan Gasifier Untuk Pembangkit Listrik Skala Kerakyatan

Oleh : **Arief Suardi**  
**Vendy Antono**  
**Prayudi**  
**Roswati Nurhasanah**

Penerbit : **INSTITUT TEKNOLOGI PLN**  
Alamat : Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat,  
Duri Kosambi, Cengkareng,  
Jakarta Barat 11750  
Telp/Fax : (021) 544 0342, 544 0344  
Email : -

Hak Cipta@2024 pada Penerbit

---

Hak cipta dilindungi oleh Undang Undang Pasal 72 ayat 1,2 dan 3 Undang-undang Republik Indonesia No. 19 Tahun 2002. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistim penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit : INSTITUT TEKNOLOGI PLN

---

Cetakan Pertama, September 2024

Editor : **Iriansyah B. Sangadji**

Design & Layout : **Akhmad Fauzi**

ISBN : -  
-

Nomor Anggota IKAPI :  
**No.574/Anggota Luar Biasa /DKI/2019**

# Daftar Isi

<b>Daftar Isi</b> .....	i
<b>Daftar Tabel</b> .....	iii
<b>Daftar Gambar</b> .....	iv
<b>Kata Pengantar</b> .....	v
<b>Bab 1. Gasifikasi</b> .....	1
1.1. Sejarah .....	1
1.2. Prinsip Gasifikasi .....	7
1.3. Proses Hidrogenasi .....	8
1.4. Stokiometri .....	9
1.5. Perbedaan Proses Pembakaran dan Gasifikasi .....	11
1.6. Pengendalian Lingkungan .....	13
1.7. Keuntungan Gasifikasi .....	14
<b>Bab 2. Pirolisis</b> .....	17
2.1. Pendahuluan .....	17
2.2. Sejarah Singkat Pirolisis .....	18
2.3. Prinsip Pirolisis .....	19
2.3.1. Konsep Umum .....	19
2.3.2. Pengaruh Laju Pemanasan .....	21
2.3.3. Pengaruh Temperatur .....	21
2.4. Produk Hasil Pirolisis .....	23
2.4.1. Produk Solid .....	24
2.4.2. Produk Likuid .....	24
2.4.3. Produk Gas .....	25
2.5. Jenis-Jenis Pirolisis .....	25
<b>Bab 3. Perancangan Gasifier Biomassa</b> .....	27
3.1. Pendahuluan .....	27
3.2. Jenis Gasifier .....	28

3.3. <i>Fixed-Bed/Moving-Bed</i> Gasifier .....	29
3.3.1. <i>Updraft</i> Gasifiers .....	29
3.3.2. Pembuatan Prototipe Gasifier .....	30
3.3.3. Pengujian Prototipe Gasifier .....	31
3.3.4. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit .....	32
3.4. Perancangan Gasifier .....	33
3.4.1. Perhitungan Nilai Laju Konsumsi Bahan Bakar .....	33
3.4.2. Perhitungan Dimensi Reaktor .....	33
3.4.3. Pembuatan Prototipe .....	34
<b>Bab 4. Hasil Pengujian Gasifier</b> .....	39
4.1. Pendahuluan .....	39
4.2. Hasil Pengujian .....	43
<b>Daftar Pustaka</b> .....	46

# Daftar Tabel

Tabel 1.	Sejarah Gasifikasi .....	3
Tabel 2.	Perbandingan Proses Gasifikasi dan Pembakaran .....	12
Tabel 3.	Persentase Massa Hasil Proses Pirolisis Dari Beragam Jenis Bahan Baku .....	20
Tabel 4.	Pengaruh Temperatur Pada Proses Pirolisis MSW	22
Tabel 5.	Pengaruh Temperatur Pada Proses Pirolisis Batubara Bituminus .....	22
Tabel 6.	Karakteristik Beberapa Proses Pirolisis .....	26
Tabel 7.	Spesifikasi Generator Set .....	43

# Daftar Gambar

Gambar 1. Periode Perkembangan Gasifikasi .....	2
Gambar 2. Pertumbuhan Kapasitas Gasifikasi Di Seluruh Dunia .....	6
Gambar 3. Metode Gasifikasi .....	8
Gambar 4. Lampu Kerosene .....	19
Gambar 5. Klasifikasi Gasifier .....	28
Gambar 6. Sistem <i>Updraft</i> Gasifier .....	30
Gambar 7. Desain 3D Reaktor Gasifier Tanpa Blower .....	31
Gambar 8. Skema Pengujian Prototipe Gasifier .....	32
Gambar 9. Reaktor Dan Pembangkit Listrik Biomassa .....	36
Gambar 10. Prototipe Gasifier Tanpa Blower .....	36
Gambar 11. Proses pembuatan reaktor gasifier .....	37
Gambar 12. Proses pembuatan cooler .....	37
Gambar 13. Proses pembuatan filter .....	37
Gambar 14. Arang Untuk Bahan Bakar .....	39
Gambar 15. Air Isolator pada Reactor .....	39
Gambar 16. Pipa <i>Cooler</i> Terendam Air .....	40
Gambar 17. <i>Valve</i> Pada Sistem Penyaringan .....	40
Gambar 18. Kondisi Api Dalam Reaktor .....	41
Gambar 19. Proses Gasifikasi Dalam Reaktor .....	42
Gambar 20. Pipa Untuk Mengalirkan Syngas .....	42
Gambar 21. Genset Yamakoyo GFH 4500 .....	43
Gambar 22. Pengujian Reaktor Pada Pembangkit Listrik ....	44

# Kata Pengantar

Segala puji syukur penulis panjatkan hanya untuk Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya, sehingga atas izin Allah, Alhamdulillah akhirnya penyusunan diktat kuliah Proses Manufaktur yang cukup sederhana ini dapat selesai. Tujuan utama penyusunan buku ajar ini adalah untuk membagi pengetahuan dan pengalaman penulis dalam merancang dan membuat reaktor gasifier untuk pembangkit listrik tenaga biomassa kelapa sawit.

Proses gasifikasi dan pirolisis biomassa hampir memiliki usia yang sama dengan habitat alam. Kedua proses tersebut telah terjadi sejak masa awal tumbuh-tumbuhan di planet ini. Lompatan api pada kebakaran hutan adalah sebuah contoh dari "pirolisis yang menyala". Rawa merupakan tempat untuk melihat contoh pembentukan gas metana melalui dekomposisi biomassa dan pembakaran selanjutnya yang bersentuhan dengan udara. Manusia, bagaimanapun, belajar untuk memanfaatkan proses ini jauh kemudian hari. Pertama, aplikasi gasifikasi skala besar untuk industri dan masyarakat yang terkonsentrasi pada batubara sebagai bahan bakarnya. Hal itu terutama dimanfaatkan untuk penerangan jalan-jalan kota dan rumah-rumah. Penggunaan gasifikasi, meskipun hampir setara teknologi pembakaran, tidak meningkat dengan industrialisasi yang sama dengan pembakaran karena pasokan yang melimpah dan harga minyak dan gas alam yang rendah. Tetapi di masa lalu telah terjadi peningkatan minat pada proses gasifikasi, yang dipicu oleh beberapa faktor:

1. Kepentingan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca sebagai akibat dari produksi energi

2. Mendorong untuk tidak bergantung pada pasokan yang kurang dapat diandalkan dan fluktuasi harga minyak dan gas.
3. Minat pada sumber energi yang dapat diperbarui dan tersedia secara lokal
4. Kenaikan harga minyak dan gas alam

Dengan adanya model reaktor gasifier biomassa kelapa sawit yang berbasis pada kerakyatan dan budaya gotong royong ini, maka keuntungan dari bisnis listrik tidak hanya dinikmati oleh pengusaha besar tapi juga bisa dirasakan oleh masyarakat umum. Dari sisi keandalan, listrik rakyat juga bisa menjadi solusi awal untuk menahan laju defisit di daerah krisis listrik, dan juga bisa menjadi penyangga seandainya program 35.000 MW menjadi terlambat. Selain itu listrik kerakyatan juga bisa menghemat cadangan Bahan Bakar Minyak (BBM) serta mengurangi efek pemanasan global.

Penulis ingin berterima kasih kepada semua pihak yang terlibat aktif dalam penyusunan buku diktat ini, terutama kepada Rektor Institut Teknologi PLN yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian tentang pembuatan gasifier biomassa dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi PLN yang telah banyak membantu dan memberikan arahan selama penyusunan buku ajar ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para mahasiswa yang ikut membantu melaksanakan penelitian sehingga seluruh kegiatannya dapat terlaksana dan terdokumentasi dengan baik.

**Tim Penulis**

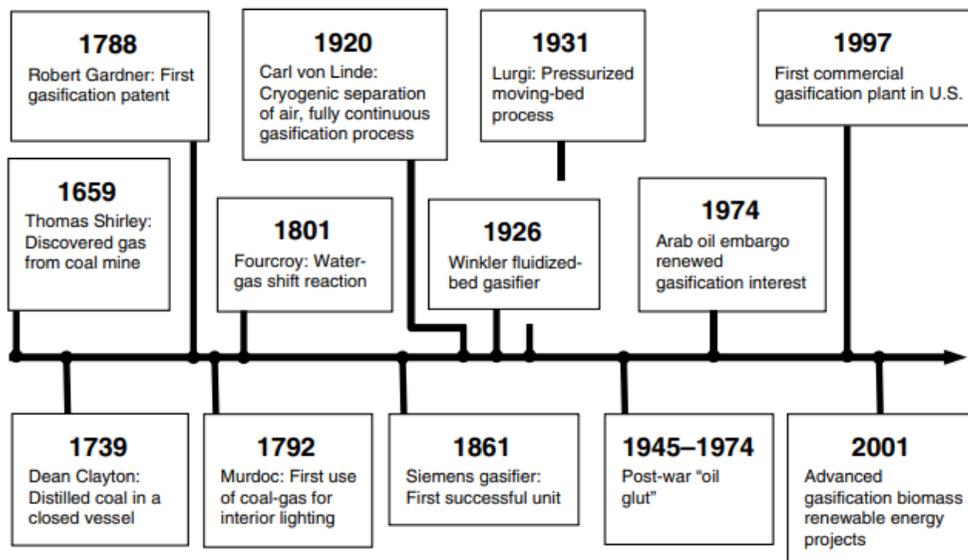
# Bab 1

## Gasifikasi

Produksi gas yang mudah terbakar dari suatu bahan bakar telah mulai dilakukan sejak lama . Secara luas, istilah gasifikasi mencakup konversi setiap bahan bakar mengandung karbon menjadi produk gas dengan kadar kalor yang tinggi. Definisi tersebut tidak menjelaskan proses pembakaran, karena gas buang tidak memiliki kadar kalor. Penjelasan tersebut termasuk tentang teknologi pirolisis, reaksi oksidasi parsial, dan proses hidrogenasi. Periode awal teknologinya berdasarkan proses pirolisis (mis., penggunaan panas karena ketiadaan unsur oksigen), yang menjadi kurang penting dalam produksi gas saat ini. Teknologi yang dominan adalah reaksi oksidasi parsial, yaitu bagaimana menghasilkan suatu bahan bakar gas sintesis (atau dikenal sebagai *syngas*) yang mengandung unsur-unsur hidrogen dan karbon monoksida dengan berbagai rasio, di mana oksidan dapat berupa oksigen murni, udara, dan/atau uap. Oksidasi parsial dapat diterapkan pada bahan baku padat, cair, dan gas, seperti batu bara, minyak residu, dan gas alam.

### 1.1. Sejarah

Penelitian awal gasifikasi yang diketahui dilakukan oleh Thomas Shirley pada tahun 1659 yang melakukan eksperimen "pencampuran hidrogen" (sekarang disebut metana). Gambar 1 menunjukkan beberapa tonggak penting dalam perkembangan gasifikasi.



**Gambar 1.** Periode Perkembangan Gasifikasi

Proses pirolisis biomassa untuk menghasilkan arang mungkin merupakan penerapan berskala besar pertama dari proses yang terkait dengan gasifikasi. Ketika kayu menjadi langka menjelang awal abad ke-18, kokas diproduksi dari batubara melalui proses pirolisis, tetapi penggunaan gas hasil dari pirolisis hanya mendapat sedikit perhatian. Perkembangan awal terinspirasi oleh kebutuhan akan *town gas* untuk penerangan jalan. Demonstrasi tentang *town gas* yang dihasilkan dari batu bara, diperlihatkan kepada British Royal Society pada tahun 1733, tetapi para ilmuwan waktu itu tidak melihat kegunaannya. Pada 1798, William Murdoch menggunakan gas-batubara (juga dikenal sebagai *town gas*) untuk menerangi bangunan utama Soho Foundry, dan pada 1802 ia memperlihatkan lampu gas kepada publik. Friedrich Winzer dari Jerman mematenkan pencahayaan menggunakan gas-batubara pada 1804 ([www.absoluteastronomy.com/topics/coal\\_gas](http://www.absoluteastronomy.com/topics/coal_gas)).

Pada tahun 1823 banyak kota di Inggris yang diterangi oleh gas tersebut. Pada saat itu, biaya lampu gas 75% lebih rendah daripada lampu minyak atau lilin, dan fakta ini membantu mempercepat perkembangan dan penyebarannya. Pada tahun 1859, lampu gas telah menyebar ke seluruh Inggris. Kemudian menyebar sampai ke Amerika Serikat sekitar tahun 1816, dengan Baltimore merupakan kota pertama yang menggunakannya. Sejarah gasifikasi dapat dibagi menjadi empat periode, sebagaimana dijelaskan pada tabel berikut ini.

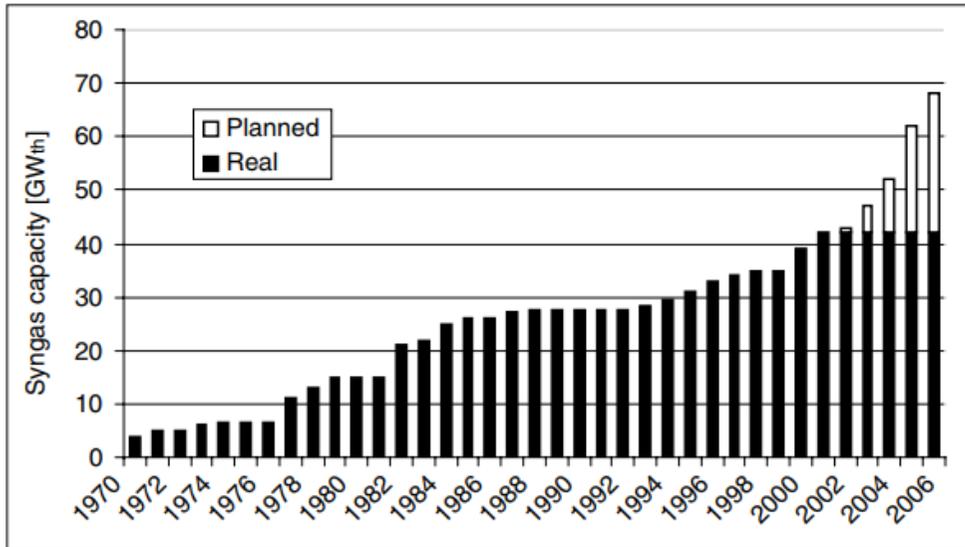
**Tabel 1.** Sejarah Gasifikasi

Periode	Perkembangan Gasifikasi
1850–1940	<p>Pada periode awal ini, gas yang dihasilkan dari batubara digunakan terutama untuk penerangan rumah, jalan, dan untuk pemanas ruangan. Penerangan menambah jam kerja di pabrik pada masa Revolusi Industri, terutama pada musim dingin yang singkat. Penemuan bohlam sekitar awal tahun 1900 mengurangi kebutuhan gas untuk penerangan, tetapi penggunaannya untuk pemanas ruangan dan memasak terus berlanjut. Dengan ditemukannya gas alam, kebutuhan akan gasifikasi batubara atau biomassa semakin menurun.</p>
1940–1975	<p>Periode ini aplikasi gasifikasi mulai digunakan pada dua bidang sebagai bahan bakar sintetis: pembakaran internal dan sintesis kimia menjadi minyak dan proses bahan kimia lainnya. Dalam Perang Dunia Kedua, pemboman Sekutu atas kilang minyak Nazi dan rute logistik minyak menyebabkan berkurangnya pasokan minyak mentah untuk mesin-mesin perang Jerman. Hal Ini memaksa Jerman untuk membuat campuran minyak dari gas batubara menggunakan Fischer-Tropsch. Bahan kimia dan bahan bakar untuk penerbangan juga diproduksi dari batubara. Sejumlah besar mobil dan truk di Eropa beroperasi menggunakan batubara atau biomassa yang tergasifikasi dalam suatu gasifier. Selama periode ini lebih dari satu juta gasifier kecil dibangun terutama untuk transportasi (lihat Gambar 2). Akhir Perang Dunia Kedua dan ketersediaan minyak berlimpah dari Timur Tengah menghilangkan kebutuhan gasifikasi untuk transportasi dan produksi bahan kimia. Berlimpahnya pasokan gas alam ditahun 1950-an menghambat</p>

Periode	Perkembangan Gasifikasi
	pengembangan gasifikasi batubara atau biomassa, tetapi produksi <i>syngas</i> dari gas alam dan zat nafta meningkat untuk memenuhi tingginya permintaan pupuk.
1975–2000	Periode ketiga dalam sejarah gasifikasi dimulai setelah Perang Yom Kippur, yang memicu embargo minyak bumi pada tahun 1973. Pada tanggal 15 Oktober 1973, anggota Organisasi Negara-negara Arab Pengekspor Minyak (OPEC) melarang ekspor minyak ke Amerika Serikat dan negara-negara barat lainnya, dimana saat itu sangat bergantung pada minyak dari Timur Tengah. Hal ini mengejutkan ekonomi barat dan memberikan alasan yang kuat untuk mengembangkan teknologi alternatif seperti gasifikasi untuk mengurangi ketergantungan pada minyak impor. Selain menyediakan gas untuk pemanas ruangan, gasifikasi juga digunakan secara komersial dalam produksi bahan baku kimia, yang secara tradisional berasal dari minyak bumi. Namun akibat penurunan harga minyak, mengurangi dorongan untuk proses gasifikasi ini, tetapi beberapa pemerintah, yang menyatakan perlunya lingkungan yang lebih bersih, memberikan dukungan untuk pengembangan besar-besaran pembangkit listrik Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)
2000-Sekarang	Pemanasan global dan ketidakstabilan politik di beberapa negara penghasil minyak memberikan suatu momentum baru untuk proses gasifikasi. Ancaman perubahan iklim membuat perlunya berganti dari bahan bakar fosil kaya karbon. Gasifikasi keluar sebagai pilihan alami untuk konversi biomassa karbon-netral terbarukan menjadi gas. Faktor kemandirian energi dan kenaikan cepat

Periode	Perkembangan Gasifikasi
	<p>harga minyak mentah mendorong beberapa negara untuk mengakui perlunya pengembangan IGCC. Daya tarik gasifikasi untuk ekstraksi yang berharga bahan baku dari residu kilang ditemukan kembali, mengarah pada pengembangan beberapa pabrik gasifikasi utama di kilang minyak. Faktanya, persiapan bahan baku kimia mengambil pangsa pasar gasifikasi yang lebih besar daripada produksi energi.</p>

Kebangkitan teknologi gasifikasi dimulai pada sekitar tahun 1990, seperti dapat dilihat pada Gambar 1. Pembangkit listrik telah muncul sebagai pasar baru yang besar untuk perkembangan teknologi ini, karena gasifikasi dipandang sebagai cara untuk meningkatkan pemanfaatan batubara serta meningkatkan efisiensi keseluruhan konversi energi kimia dalam batubara menjadi energi listrik. Gagasan untuk menggunakan gas sintesis sebagai bahan bakar untuk turbin gas bukanlah hal baru. Gumz (1950) mengusulkan hal ini pada saat suhu pada *inlet* turbin gas sekitar 700°C. Dan sebagian besar pengembangan teknologi turbin gas dengan suhu *inlet* sekarang adalah sekitar 1400°C yang berhasil diaplikasikan. Pabrik-pabrik percontohan telah dibangun di Amerika Serikat (Cool Water, 100 MW, 1977; dan Plaquemine, 165 MW, 1987) dan di Eropa (Lünen, 170 MW, 1972; Buggenum, 250 MW, 1992; dan Puertollano, 335 MW, 1997).



**Gambar 2.** Pertumbuhan Kapasitas Gasifikasi Di Seluruh Dunia

Perkembangan kedua, yang telah muncul selama periode 1990-an, adalah peningkatan gasifikasi residu minyak di kilang. Kilang minyak berada di bawah tekanan ekonomi untuk mengubah produk mereka ke jenis produk yang lebih ringan, dan munculnya tekanan untuk mengurangi emisi sulfur baik dalam proses produksi maupun dalam produk yang dihasilkan. Sebagian besar residu tersebut telah digunakan sebagai bahan bakar minyak berat, baik di kilang itu sendiri, atau di pembangkit tenaga listrik untuk bahan bakar bangunan di laut. Gasifikasi residu kini telah menjadi salah satu alat penting dalam mengatasi masalah ini. Meskipun residu memiliki kandungan hidrogen yang rendah, mereka dapat dikonversi menjadi hidrogen murni dengan gasifikasi. Hidrogen digunakan untuk mengonversi fraksi berat lainnya untuk menghasilkan produk-produk yang lebih ringan seperti bensin, minyak tanah, dan diesel. Pada saat yang sama, unsur belerang dihilangkan dalam kilang, sehingga mengurangi kadar belerang dalam produk akhir yang dihasilkan (Higman 1993). Di Italia, sebuah negara yang sangat bergantung pada minyak untuk pembangkit tenaga listrik, tiga kilang minyak telah memperkenalkan teknologi gasifikasi sebagai cara untuk proses desulfurisasi minyak bahan bakar berat dan menghasilkan tenaga listrik. Produksi unsur hidrogen juga dimasukkan ke dalam skema secara keseluruhan. Proyek serupa direalisasikan di kilang Pernis Shell di Belanda. Kilang-

kilang Eropa lainnya memiliki proyek serupa yang masih dalam tahap perencanaan.

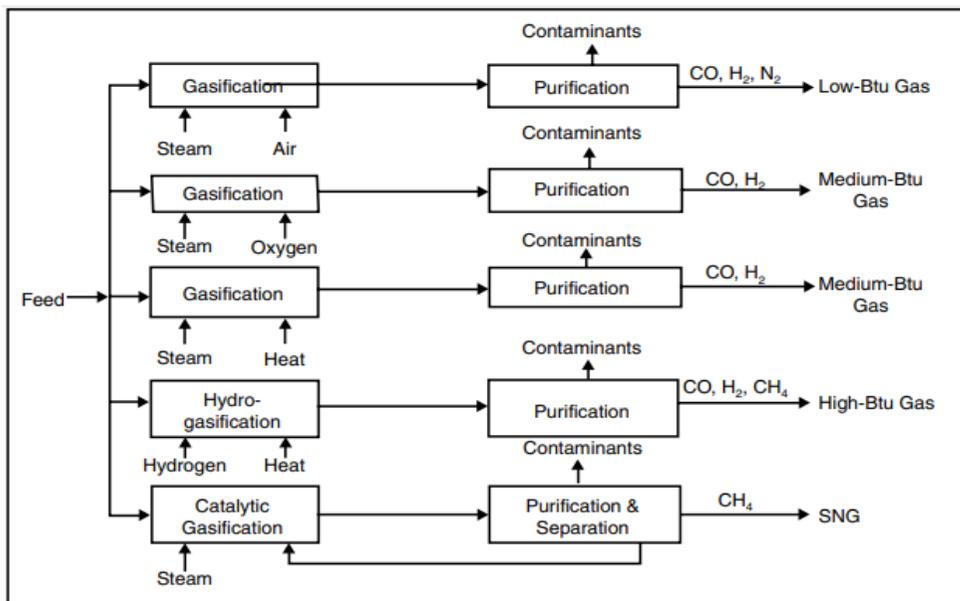
Salah satu kekuatan pendorong tambahan untuk peningkatan proses oksidasi parsial adalah pengembangan proyek "*Gas-to-liquid*". Untuk transportasi, bahan bakar cair memiliki keunggulan yang tidak diragukan, yaitu mudah dalam penanganan dan memiliki kepadatan energi yang tinggi. Untuk konsumen, hal ini diterjemahkan menjadi mobil yang dapat menempuh hampir 1000 km dengan 50 liter bahan bakar merupakan performa yang belum tertandingi oleh bahan bakar alternatif manapun. Untuk perusahaan yang bergerak di bidang energi, prospek menciptakan bahan bakar cair sintetik merupakan cara untuk membawa gas alam dari lokasi-lokasi yang jauh atau "terdampar" ke lokasi konsumen menggunakan infrastruktur yang ada. Gasifikasi memiliki peran penting dalam skenario ini. Suatu pabrik di daerah Bintulu, Malaysia, mampu memproduksi sekitar 12.000 bbl / d hidrokarbon cair, yang merupakan salah satu dari sejumlah proyek yang saat ini masih dalam berbagai tahap perencanaan di seluruh dunia.

## **1.2. Prinsip Gasifikasi**

Gasifikasi adalah proses untuk mengubah bahan karbon menjadi gas yang mudah terbakar atau sintetis (mis.,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ). Secara umum, proses gasifikasi melibatkan reaksi karbon dengan udara, oksigen, uap, karbondioksida, atau campuran gas-gas ini pada temperatur  $1300^\circ F$  atau lebih, untuk menghasilkan produk gas yang dapat dimanfaatkan untuk tenaga listrik, sumber panas, atau sebagai bahan baku untuk sintesis bahan kimia, bahan bakar cair, atau bahan bakar gas lainnya (seperti hidrogen).

Setelah bahan karbon padat atau cair dikonversi menjadi gas, zat yang tidak diinginkan seperti senyawa sulfur dan abu dapat dihilangkan. Berbeda dengan proses pembakaran, yang dapat bekerja dengan udara berlebih, proses gasifikasi beroperasi pada kondisi substoikiometrik dengan suplai oksigen terkontrol (kurang lebih 35 persen dari jumlah  $O_2$  yang secara teoritis diperlukan untuk pembakaran sempurna) sehingga panas dan bahan bakar gas diproduksi saat bahan karbon tersebut mulai bereaksi. Beberapa proses gasifikasi juga menggunakan proses pemanasan tidak langsung, untuk menghindari pembakaran bahan karbon dalam reaktor

gasifikasi dan menghindari pencampuran produk gas dengan nitrogen dan kelebihan CO<sub>2</sub>. Gambar 3 menunjukkan metode utama untuk proses gasifikasi bahan karbon. Ketika bahan berkarbonasi dipanaskan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam proses gasifikasi, terjadi pirolisis. Selama pirolisis, hidrokarbon yang kaya akan hidrogen akan terbentuk serta tar, fenol, dan gas hidrokarbon dilepaskan. Pada proses pirolisis, bahan baku didekomposisi secara termal untuk menghasilkan karbon padat dan aliran produk gas yang memiliki kandungan hidrogen lebih tinggi daripada bahan umpan karbon.



Gambar 3. Metode Gasifikasi

### 1.3. Proses Hidrogenasi

Dalam proses gasifikasi, bahan baku mengalami hidrogenasi. Hal ini berarti hidrogen ditambahkan secara langsung atau tidak langsung atau bahan baku dipirolisasi untuk menghilangkan karbon untuk menghasilkan produk dengan rasio hidrogen-karbon yang lebih tinggi daripada bahan baku. Proses-proses ini dapat dilakukan secara terpisah atau bersamaan. Semakin banyak hidrogen yang ditambahkan atau semakin banyak karbon yang dihilangkan, semakin rendah efisiensi keseluruhan proses produksi gas sintesis. Dalam proses

hidrogenasi tidak langsung, uap digunakan sebagai sumber hidrogen dan hidrogen dihasilkan dalam reaktor gasifikasi.

Proses hidrogenasi tidak langsung yang masih dalam pengembangan adalah gasifikasi katalitik. Dalam proses ini, katalis mempercepat reaksi gasifikasi, menghasilkan pembentukan hidrogen dan CO, pada suhu yang relatif rendah. Proses ini juga mendorong pembentukan katalitik metana pada suhu rendah yang sama di dalam reaktor yang sama. Deaktivasi dan biaya katalis telah menjadi penghalang utama untuk komersialisasi proses ini.

Dalam proses hidrogenasi langsung, bahan baku terpapar unsur hidrogen pada tekanan tinggi untuk menghasilkan gas dengan kandungan metana lebih tinggi dibandingkan proses hidrogenasi tidak langsung. Proses hidrogenasi tidak langsung juga dikenal sebagai gasifikasi udara atau oksigen, tergantung pada unsur udara atau oksigen yang digunakan sebagai sumber oksidan. Jika panas juga diberikan secara tidak langsung, maka udara atau oksigen tidak digunakan untuk membakar sebagian bahan baku dalam gasifier. Ini menyebabkan peningkatan suhu reaktor menjadi suhu reaksi gasifikasi yang diinginkan, yang dikenal sebagai proses *steam reforming*. Proses hidrogenasi langsung disebut hidro-gasifikasi.

#### 1.4. Stokiometri

Tergantung pada proses gasifikasi yang dilakukan, reaksi-reaksi yang terjadi dalam gasifier meliputi:

- (1)  $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- (2)  $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$
- (3)  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
- (4)  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
- (5)  $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$
- (6)  $C + CO_2 \rightarrow 2CO$
- (7)  $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$
- (8)  $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$
- (9)  $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$
- (10)  $C + H_2O \rightarrow \frac{1}{2}CH_4 + \frac{1}{2}CO_2$

Sebagian besar oksigen yang dimasukkan ke dalam gasifier, baik sebagai oksigen murni atau udara, digunakan dalam reaksi (1)

sampai dengan (3) untuk menghasilkan panas yang diperlukan untuk mengeringkan bahan bakar padat, memecah ikatan kimia, dan menaikkan suhu reaktor agar terjadinya reaksi gasifikasi (4) hingga (9). Reaksi (4) dan (5), yang dikenal sebagai reaksi air-gas, adalah reaksi gasifikasi utama yang bersifat endotermik, temperatur tinggi dan tekanan rendah. Reaksi (6), yang dikenal sebagai *Boudourd Reaction*, bersifat endotermik dan jauh lebih lambat daripada reaksi (1) pada temperatur yang sama tanpa adanya katalis. Reaksi (7), hidrogasifikasi, sangat lambat kecuali pada tekanan tinggi. Reaksi (8), reaksi pergeseran air-gas, dapat menjadi penting jika harus memproduksi H<sub>2</sub>. Hasil optimal diperoleh pada suhu rendah (hingga mencapai 500°F) dengan adanya zat katalis dan tekanan tidak berpengaruh pada peningkatan produksi hidrogen. Reaksi (9) adalah reaksi metanasi yang sangat lambat pada suhu rendah tanpa adanya zat katalis. Reaksi (10) adalah reaksi termal netral yang menunjukkan bahwa proses gasifikasi dapat berjalan dengan adanya sedikit panas, tetapi pembentukan metana lambat relatif terhadap reaksi (4) dan (5) kecuali dikatalisasi.

Selain agen gasifikasi (udara, oksigen, atau uap) dan juga suhu dan tekanan, faktor-faktor lain yang juga mempengaruhi adalah komposisi kimia, nilai kalor, dan dan aplikasi penggunaan gas produk akhir dari proses gasifier. Faktor-faktor berikut mempengaruhi kualitas produk gas:

- Komposisi bahan baku
- Persiapan bahan baku
- Kadar kalor reaktor
- Waktu tinggal
- Konfigurasi seperti:
  - Pemakaian kering atau bubuk
  - Bentuk aliran bahan reaktan
  - Sistem pembuangan (abu kering atau terak)
  - Pembangkitan dan metode perpindahan panas (langsung atau tidak langsung)
- Sistem pembersihan Syngas (Pada suhu rendah atau tinggi serta proses yang digunakan untuk menghilangkan unsur belerang, nitrogen, dan senyawa lain yang dapat mempengaruhi kualitas syngas).

Bergantung pada konfigurasi sistem gasifier, kondisi operasi, dan agen gasifikasi yang digunakan, empat jenis gas sintetis yang dapat diproduksi adalah:

1. Gas dengan nilai kalor rendah (3,5 hingga 10 MJ / m<sup>3</sup> atau 100 hingga 270 Btu / ft<sup>3</sup>) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar turbin gas dalam sistem IGCC, sebagai bahan bakar boiler untuk produksi uap, dan sebagai bahan bakar untuk proses peleburan dan reduksi bijih besi. Namun, karena kandungan nitrogennya yang tinggi dan nilai kalor yang rendah, gas jenis ini tidak cocok sebagai pengganti gas alam atau untuk sintesis kimia. Penggunaan gas dengan kalor rendah untuk bahan bakar juga meningkatkan biaya perbaikan dan pemrosesan gas, termasuk biaya kompresi jika bahan bakar tekanan tinggi digunakan.
2. Gas nilai kalor sedang (10 hingga 20 MJ / m<sup>3</sup> atau 270 hingga 540 Btu / ft<sup>3</sup>) dapat digunakan sebagai bahan bakar gas untuk turbin gas dalam aplikasi IGCC, untuk pengganti gas alam (Substitute Natural Gas) yang dikombinasikan dengan proses metanasi, produksi hidrogen, sebagai umpan bahan bakar, dan untuk sintesis kimia dan bahan bakar.
3. Gas bernilai kalor tinggi (20 hingga 35 MJ / m<sup>3</sup> atau 540 hingga 940 Btu / ft<sup>3</sup>) dapat digunakan sebagai bahan bakar gas untuk turbin gas dalam aplikasi IGCC, untuk produksi SNG dan hidrogen, sebagai umpan bahan bakar, dan untuk bahan kimia dan campuran bahan bakar. Tidak diperlukan banyak peningkatan dan proses methanasi untuk menghasilkan SNG.
4. SNG (lebih dari 35 MJ / m<sup>3</sup> atau 940 Btu / ft<sup>3</sup>) dapat langsung digunakan sebagai pengganti gas alam dan cocok untuk produksi hidrogen dan bahan kimia serta sebagai umpan bahan bakar.

### **1.5. Perbedaan Proses Pembakaran dan Gasifikasi**

Gasifikasi bukan seperti proses insinerasi atau pembakaran, tetapi merupakan proses konversi untuk menghasilkan produk gas yang lebih bermanfaat dari bahan mengandung karbon. Tabel 1.1 menunjukkan perbandingan umum proses gasifikasi dan pembakaran. Baik proses gasifikasi maupun pembakaran sama-sama mengubah bahan karbon menjadi produk gas. Proses gasifikasi beroperasi tanpa oksigen atau dengan jumlah oksigen yang terbatas,

sementara proses pembakaran beroperasi dengan kandungan oksigen yang berlebih.

Tujuan proses pembakaran adalah untuk menghancurkan bahan karbon secara termal agar dapat menghasilkan panas. Sebaliknya, tujuan gasifikasi adalah mengubah bahan karbon menjadi produk yang lebih bermanfaat, ramah lingkungan, serta dapat digunakan untuk berbagai keperluan termasuk memproduksi bahan kimia, bahan bakar, dan energi. Unsur-unsur yang umumnya ditemukan dalam bahan berkarbon seperti C, H, N, O, S, dan Cl dikonversi menjadi syngas yang terdiri dari CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl, COS, HCN, unsur karbon, dan gas hidrokarbon. Produk dari proses pembakaran adalah CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, dan HCl.

**Tabel 2.** Perbandingan Proses Gasifikasi dan Pembakaran

Perbandingan	Gasifikasi	Pembakaran
Tujuan	Menghasilkan produk yang lebih bermanfaat dan dapat digunakan, yang berasal dari bahan limbah atau bahan yang berkualitas rendah	Menghasilkan panas atau penghancuran bahan limbah
Jenis Proses	Konversi termal dan kimia, yang dilakukan tanpa atau kandungan oksigen terbatas	Pembakaran menggunakan udara berlebih
Komposisi Gas (sebelum pembersihan)	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> , dan bahan partikulat	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , dan bahan partikulat
Produk Gas	Pembersihan syngas pada tekanan atmosferik hingga tekanan tinggi ditentukan oleh desain gasifier	Pembersihan gas buang pada tekanan atmosfer
	Syngas digunakan untuk bahan kimia, bahan bakar, atau pembangkit energi listrik	Gas buang diteruskan ke atmosfer
	Terdapat kandungan sulfur atau asam sulfat dalam bahan bakar	Kandungan belerang dalam bahan bakar dikonversi menjadi SO <sub>2</sub> yang harus dihilangkan menggunakan

Perbandingan	Gasifikasi	Pembakaran
		sistem pembersihan gas buang, sehingga menghasilkan bahan limbah.
Produk padat yang dihasilkan	Arang atau terak	<i>Bottom Ash</i> (Abu hasil pembakaran yang tertinggal)
Proses terhadap abu/arang atau terak	Proses dengan suhu rendah untuk menghasilkan arang yang bisa dijual sebagai bahan bakar	<i>Bottom ash</i> dan <i>fly ash</i> dikumpulkan, diolah, dan dibuang sebagai bahan limbah berbahaya.
	Proses dengan suhu tinggi menghasilkan terak, bahan tidak berbahaya yang cocok untuk digunakan sebagai bahan konstruksi.	
	Partikel-partikel halus didaur ulang dalam gasifier. Dalam beberapa kasus, partikel halus tersebut diproses untuk menghasilkan logam mulia.	
Temperatur	1300°F - 2700°F	1500°F - 1800°F
Tekanan	Atmosfer hingga tekanan tinggi	Atmosfer

## 1.6. Pengendalian Lingkungan

Tergantung pada komposisi bahan baku, gas hasil pembakaran diolah dalam serangkaian unit proses untuk menghilangkan partikel halus, logam berat, dan gas anorganik bersifat asam. Proses-proses tersebut dapat mencakup pendinginan gas, Venturi scrubber, endapan basah elektrostatis. Beberapa proses juga dapat menggunakan suatu menara khusus yang dikemas untuk menghilangkan gas asam atau filter untuk menghilangkan partikel halus. Demister biasanya digunakan untuk menghilangkan uap sebelum gas hasil pembakaran dipancarkan ke atmosfer. Ketika kandungan belerang dalam bahan bakar tinggi dan batas SO<sub>2</sub> harus dipenuhi, proses desulfurisasi gas buang di dalam ruang bakar, saluran gas buang, atau proses tambahan

lain harus dilakukan untuk menghilangkan belerang. Penambahan bahan sorbent tidak hanya menambah biaya untuk sistem pembakaran dan biaya operasi tetapi juga meningkatkan jumlah limbah padat yang harus diolah jika tidak ada produk akhir yang bisa dihasilkan dari produk sampingan ini.

Berdasarkan proses gasifikasi, syngas awalnya didinginkan secara langsung dengan air atau gas hasil daur ulang yang dingin. Partikel juga dapat dihilangkan menggunakan suatu filter panas. Pendinginan tidak langsung melalui alat penukar panas dapat dilakukan setelah pendinginan syngas sebelum partikel-partikel halus dihilangkan. Syngas kemudian diproses lebih lanjut untuk menghilangkan senyawa sulfur seperti  $H_2S$ ,  $COS$ , dan  $NH_3$ . Pengolahan konvensional yang menghasilkan efisiensi penghilangan belerang hingga 99%, digunakan dalam industri gas alam dan minyak bumi. Teknologi konvensional yang sama dapat digunakan untuk menghasilkan belerang dengan tingkat kemurnian tinggi yang merupakan produk sampingan dari syngas.

Ketika pendinginan air secara langsung dilakukan, beberapa partikel tertahan di air dan harus dilakukan penyaringan. Partikel-partikel dan syngas yang terkondensasi mengandung beberapa gas yang mampu larut dalam air seperti  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $HCl$ , dan  $H_2S$ . Senyawa-senyawa ini biasanya didaur ulang ke dalam gasifier atau scrubber setelah produk padat dihilangkan. Sebagian air dibersihkan dari sistem untuk mencegah penumpukan larutan garam. Air yang dibersihkan kemudian diproses dalam pengolahan konvensional air limbah.

## **1.7. Keuntungan Gasifikasi**

Jika dilihat dari sisi lingkungan, gasifikasi menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan proses pembakaran bahan padat, minyak, limbah industri, dan domestik yang mengandung bahan karbon. Keuntungan pertama adalah emisi sulfur, nitrogen oksida, bahan asam, serta partikel-partikel pada gasifikasi berkurang secara signifikan karena pembersihan syngas. Unsur belerang dalam gasifier dikonversi menjadi  $H_2S$ , dan nitrogen diubah menjadi nitrogen diatomik ( $N_2$ ) dan  $NH_3$ . Senyawa  $H_2S$  dan  $NH_3$  dihilangkan dalam proses selanjutnya, menghasilkan produk syngas yang bersih. Oleh karena itu, jika syngas yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai bahan

bakar pada turbin gas untuk menghasilkan listrik atau pada boiler untuk menghasilkan uap atau air panas, produksi sulfur dan nitrogen oksida akan berkurang secara signifikan. Jika produk syngas digunakan sebagai produk setengah jadi untuk pembuatan bahan kimia, bahan asam tersebut tidak terbentuk. Partikel-partikel dalam produk syngas awal juga berkurang secara signifikan karena sistem pembersihan gas yang digunakan untuk memenuhi spesifikasi pabrikan turbin gas. Proses penghapusan partikel-partikel tersebut terjadi dalam scrubber atau saringan kering, dalam sistem pendinginan gas, dan penghilangan gas asam. Sebuah studi dilakukan oleh Departemen Energi AS pada tahun 1996, penggantian sistem konvensional berbahan bakar batu bara dengan sistem IGCC dapat mengurangi kandungan sulfur, nitrogen oksida, serta partikel-partikel emisi.

Keuntungan kedua adalah bahwa senyawa furan dan dioksin tidak terbentuk selama proses gasifikasi. Pembakaran bahan organik adalah sumber utama dari polutan yang sangat beracun dan karsinogenik. Beberapa alasan mengapa senyawa furan dan dioksin tidak terbentuk dalam proses gasifikasi adalah:

1. Sedikitnya unsur oksigen mencegah pembentukan klorin bebas dari HCl dan membatasi klorinasi dalam gasifier.
2. Suhu tinggi pada proses gasifikasi secara efektif menghancurkan furan atau dioksin dalam bahan baku.

Lebih lanjut, jika syngas dibakar dalam turbin gas di mana muncul kelebihan oksigen, suhu pembakaran yang tinggi tidak mendukung untuk pembentukan klorin bebas. Selain itu, pembentukan dioksin atau furan setelah pembakaran tidak diharapkan terjadi karena sangat sedikit sekali dari partikel-partikel yang diperlukan untuk pembentukan senyawa-senyawa ini yang terdapat dalam gas buang.

Dioksin atau furan merupakan molekul atau senyawa yang tersusun dari karbon dan oksigen. Senyawa ini ketika bereaksi dengan halogen seperti klorin atau bromin memiliki sifat beracun. Sebagian besar penelitian tentang dioksin dan furan berkaitan dengan elemen yang terklorinasi. Secara umum dapat disimpulkan bahwa dioksin dan furan adalah produk sampingan dari proses pembakaran termasuk

pembakaran limbah pada rumah tangga atau proses insinerasi. Dalam proses pembakaran, senyawa hidrokarbon bereaksi dengan senyawa atau molekul yang terklorinasi untuk membentuk furan atau dioksin serta dapat terbentuk dalam sistem pendinginan gas buang setelah pembakaran karena adanya senyawa prekursor seperti, klorin bebas, karbon dan tembaga yang tidak terbakar dalam *fly ash*. Keterbatasan data yang tersedia pada konsentrasi senyawa organik volatil, senyawa organik semi-volatil (SVOCs), dan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) dari proses gasifikasi. Data tersebut menunjukkan bahwa VOC, SVOCs, dan PAH tidak dapat dideteksi dalam aliran gas buang dari proses IGCC atau, dalam beberapa kasus di mana dapat dideteksi, berada pada tingkat yang sangat rendah (berdasarkan urutan bagian per miliar). Analisis syngas juga menunjukkan lebih dari 99,99 persen efisiensi penghancuran dan penghilangan klorobenzena dan heksaklorobenzena dan sebagian miliar atau kurang berdasarkan PAH dan VOC terpilih.

# Bab 2

## Pirolisis

### 2.1. Pendahuluan

Bab ini akan membahas tentang teknologi, praktik, dan kemunculan teknologi pirolisis. Fokus utama adalah pada aplikasi utama pengolahan limbah, dan aplikasi proses pirolisis batubara dan biomassa untuk produksi bahan bakar sintetis. Pirolisis (juga dikenal sebagai karbonisasi, destilasi destruktif, distilasi kering, atau *retorting*) adalah dekomposisi kimia yang terinduksi dalam bahan organik oleh panas tanpa adanya unsur oksigen. Dalam praktiknya, tidak mungkin mencapai atmosfer bebas oksigen secara penuh; sistem pirolitik dioperasikan dengan jumlah stoikiometrik oksigen yang kurang. Beberapa unsur oksigen akan muncul dalam sistem pirolitik, reaksi oksidasi memang terjadi. Jika bahan mudah menguap (*semi-volatile*) muncul, desorpsi termal juga akan terjadi. Proses pirolisis akan menghasilkan berbagai produk turunan padat dan cair, dan bahan bakar gas akan tergantung pada kondisi proses dan senyawa-senyawa yang terdapat pada bahan baku organik.

Terdapat dua perbedaan utama antara proses pembakaran dan pirolisis. Pertama, proses pembakaran bersifat eksotermik (menghasilkan panas), sedangkan pirolisis adalah proses endotermik (membutuhkan penambahan panas). Kedua, produk-produk yang dihasilkan dari proses pembakaran adalah CO<sub>2</sub>, air, dan abu, sedangkan dengan produk dari pirolisis adalah arang, minyak atau tar, dan gas bahan bakar. Produk-produk tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk proses pembakaran atau sebagai produk setengah jadi untuk bahan sintesis dan produksi bahan kimia. Pirolisis memiliki keunggulan yang memungkinkan penghilangan dan pemisahan sebagian besar senyawa pengotor seperti sulfur. Pirolisis bukanlah hal baru dan penerapannya tidak terbatas hanya pada produksi skala kecil dan secara tradisional telah digunakan dalam pembuatan arang. Sebelum abad ke-18, kayu dan arang merupakan bahan utama dalam industri metalurgi. Pada 1700-an, pirolisis batubara diaplikasikan untuk produksi kokas, sebagai pengganti arang

di industri metalurgi, dan untuk produksi bahan bakar gas untuk penerangan. Pada awal 1800-an, bahan bakar gas yang dihasilkan oleh pirolisis batubara digunakan untuk penerangan jalan, pertama di London dan kemudian New York, Baltimore, dan kota-kota besar lainnya di dunia. Seiring waktu berjalan, teknologi gasifikasi terbukti lebih ekonomis untuk konversi batubara menjadi bahan bakar cair dan gas.

Penemuan cadangan besar minyak bumi mengakhiri praktik komersial skala besar untuk konversi batubara, minyak, dan pasir tar menjadi gas dan bahan bakar cair melalui pirolisis dan teknik lainnya. Meskipun demikian, upaya pengembangan untuk teknologi ini terus berlangsung di Amerika Serikat, Jepang, Brasil, dan sejumlah negara Eropa dalam menanggapi krisis energi dunia dan sebagai teknologi untuk pembuangan limbah. Penekanan pada isu-isu lingkungan telah memperbaharui minat dalam pirolisis biomassa suhu rendah untuk produksi biofuel dan pirolisis suhu tinggi, termasuk pirolisis untuk penghancuran limbah berbahaya.

## **2.2. Sejarah Singkat Pirolisis**

Arang hasil dari pembakaran kayu melalui pirolisis sangat penting untuk proses ekstraksi besi dari bijih besi di periode pra-industri. Gambar 3.2 menunjukkan jenis oven berbentuk sarang lebah yang digunakan pada masa-masa awal untuk menghasilkan arang dari biomassa menggunakan jenis proses pirolisis lambat. Praktek ini berlanjut sampai pasokan kayu hampir habis dan batu bara, mulai diproduksi dengan biaya murah dari tambang bawah tanah, menggantikan arang untuk produksi besi.

Industri petrokimia modern berutang banyak pada penemuan proses produksi minyak tanah menggunakan pirolisis. Pada pertengahan 1840-an, Abraham Gesner, seorang dokter yang berpraktik di Halifax, Kanada mulai mencari jenis minyak yang lebih bersih untuk menggantikan minyak ikan paus (*whale oil*) yang digunakan untuk penerangan pada saat itu. Dengan secara hati-hati menyaring beberapa gumpalan batu bara pada suhu 427 ° C, memurnikan produk dengan mengolahnya dengan asam sulfat dan kapur, dan kemudian meratakannya kembali, ia memperoleh beberapa gram cairan bening (Gesner, 1861). Ketika cairan ini dibakar dalam lampu minyak yang mirip dengan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3,

ternyata menghasilkan cahaya terang jernih yang jauh lebih baik dari cahaya berasap yang dihasilkan oleh pembakaran minyak ikan paus. Gesner menyebut bahan bakarnya *kerosene* (minyak tanah) – diambil dari bahasa Yunani yang artinya lilin dan minyak. Kemudian, pada tahun 1850-an, ketika minyak mentah mulai diproduksi di kota Pennsylvania dan Ontario, Gesner juga dapat menghasilkan *kerosene* dari proses ekstraksi minyak mentah tersebut.

Penemuan *kerosene* atau minyak tanah tersebut, yang merupakan bahan bakar cair pertama yang dapat diangkut, membawa perubahan dalam pencahayaan lampu yang bahkan bisa sampai ke bagian-bagian dunia yang paling jauh sekalipun. Hal Itu juga memiliki dampak positif besar pada proses ekologi. Sebagai contoh, pada tahun 1846 lebih dari 730 kapal memburu ikan paus untuk memenuhi permintaan besar akan minyak ikan paus. Hanya dalam kurun waktu beberapa tahun setelah penemuan minyak tanah, perburuannya dikurangi menjadi hanya beberapa kapal, sehingga menyelamatkan paus dari ancaman kepunahan.



Gambar 4. Lampu Kerosene

## **2.3. Prinsip Pirolisis**

### **2.3.1. Konsep Umum**

Proses pirolisis dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu, proses suhu rendah dan suhu tinggi. Produk dari proses pirolisis

berbeda dan dapat dikontrol oleh suhu dan laju pemanasan material. Tabel memberikan ringkasan variasi dari produk menggunakan bahan baku biomassa dan batubara. Pada suhu tinggi produk utama yang dihasilkan adalah gas, sedangkan pada suhu rendah produk utama adalah tar atau *heavy oil*. Laju pemanasan yang tinggi meminimasi pembentukan arang dengan memecahkan menurunkan spesies molekul yang lebih tinggi menjadi produk gas. Probststein dan Hicks memberikan ringkasan grafis dari pirolisis batubara produk sebagai fungsi laju pemanasan, *residence time*, dan suhu. Tabel menunjukkan bahwa gas dan air adalah hasil dari pirolisis batubara pada suhu tinggi, saat batubara dipanaskan pada suhu 900°C hingga 1000°C dalam waktu sepersekian detik, dan ketika batubara dipanaskan pada suhu yang sama selama 1 hingga 2 jam.

**Tabel 3.** Persentase Massa Hasil Proses Pirolisis  
Dari Beragam Jenis Bahan Baku

Bahan Baku	Gas Kalor Rendah	Minyak	Abu/Arang
Batubara	56	31	10
Minyak Serpih	4	16	80
Tongkol Jagung	17	22	26
Pupuk	20	18	28
<i>Municipal Solid Waste (MSW)</i>	23	11	< 50
Kertas	16	47	10
Serpihan Kayu	23	19	27

Ketika batubara atau biomassa dipanaskan, banyak reaksi termasuk dehidrasi, keretakan, isomerisasi, dehidrogenasi, aromatisasi, dan kondensasi terjadi. Produk yang dihasilkan adalah air, karbondioksida, hidrogen, gas lain, minyak, tar, dan arang. Hasil produk bervariasi, tergantung pada komposisi bahan baku tertentu, ukuran partikel, laju pemanasan, padatan, *residence time*, dan suhu reaktor.

Seperti yang telah dijelaskan, komposisi bahan baku dapat sangat mempengaruhi hasil produk pirolisis. Tabel di atas menunjukkan hasil produk dari pirolisis dengan berbagai bahan baku biomassa dan fosil pada suhu 500°C. Data eksperimental dengan bahan biomassa menunjukkan bahwa waktu devolatilisasi meningkat berbanding lurus ukuran partikel. Ukuran partikel bahan baku juga mempengaruhi laju

pemanasan. Fluks dan laju pemanasan lebih rendah pada partikel yang lebih besar dibandingkan kecil. Partikel besar memanaskan dengan laju yang lebih lambat; suhu partikel rata-rata lebih rendah dengan laju devolatilisasi dan hasil yang lebih rendah. Proses awal dengan partikel batubara menunjukkan bahwa untuk partikel kecil, ukuran kurang dari 100 mikron, ukuran partikel tidak lagi menjadi faktor yang signifikan.

### **2.3.2. Pengaruh Laju Pemanasan**

Pengaruh laju pemanasan terhadap hasil proses pirolisis sulit diukur ketika saat bersamaan harus menjaga kondisi proses lainnya konstan. Secara umum diyakini bahwa pemanasan secara cepat menghasilkan komponen volatil yang lebih tinggi dibandingkan proses pemanasan yang lebih lambat serta kondisi arang yang lebih reaktif. Hasil eksperimen dan kepadatan arang pada proses pirolisis lambat dan cepat dengan berbagai bahan biomassa yang disajikan dalam Tabel 4.3 menunjukkan hasil volatil yang lebih tinggi dan arang yang kurang padat, lebih keropos, dan lebih reaktif untuk reaksi pirolisis yang lebih cepat.

Dalam eksperimen proses pemanasan lambat, penghapusan komponen volatil dari biomassa secara lambat memungkinkan terjadinya reaksi sekunder antara partikel arang dan volatil yang mendorong pembentukan arang yang berikutnya. Penghapusan senyawa volatil yang cepat dari reaktor dalam eksperimen pemanasan cepat mencegah reaksi sekunder terjadi, menghasilkan komponen volatil yang lebih tinggi. Arang juga berbentuk kurang padat, lebih keropos, dan reaktif karena arang hasil dari reaksi sekunder tidak terbentuk di lokasi penuangan aktif. Eksperimen awal oleh para peneliti yang berbeda menunjukkan bahwa peningkatan hasil yang dikaitkan dengan peningkatan laju pemanasan terutama dengan berbagai kondisi eksperimen yang digunakan untuk mencapai laju pemanasan yang lebih tinggi.

### **2.3.3. Pengaruh Temperatur**

Temperatur secara signifikan mempengaruhi hasil dan komposisi dari produk pirolisis. Temperatur tinggi akan menghasilkan gas, sementara suhu rendah akan mendorong pembentukan arang dan tar. Produk yang dihasilkan dari bahan baku biomassa yang berbeda akan

menghasilkan produk serupa pada suhu tertentu, meskipun hasil produk gas, cairan, dan arang bisa sangat berbeda tergantung pada bahan baku tersebut. Data pada beberapa literatur menunjukkan bahwa hasil gas dan kandungan hidrogen dari produk gas meningkat dengan meningkatnya suhu sementara nilai *Higher Heating Value* (HHV) gas tetap relatif konstan. Peningkatan suhu juga akan mengurangi produksi arang dan senyawa volatil.

**Tabel 4.** Pengaruh Temperatur Pada Proses Pirolisis MSW

	Temperatur (°C)			
	400 - 440	620 - 690	740 - 780	1000
<b>Produk Yang Dihasilkan dan Recovery</b>				
Gas (wt%)	5,27	7,74	8,36	17,94
Likuid (wt%)	1,18	9,45	15,0	25,4
Arang Batubara (wt%)	93,1	83,8	71,9	53,0
Recovery (wt%)	99,6	101,0	95,4	97,3
<b>Komposisi Gas</b>				
H <sub>2</sub> (mol%)	0,0	0,0	0,06	1,01
CO (mol%)	0,0	0,21	0,4	2,42
CO <sub>2</sub> (mol%)	0,11	0,39	0,49	1,23
CH <sub>4</sub> (mol%)	0,0	0,22	0,59	2,49
CH <sub>gas</sub> (mol%)	0,0	0,9	1,56	3,95

Tabel di bawah menunjukkan pengaruh suhu terhadap hasil produk dan komposisi dari proses pirolisis limbah padat sampah perkotaan (MSW) dan batubara jenis bituminus. Data lain menunjukkan bahwa, pada suhu-suhu tertentu, produksi arang tidak berkurang pada ukuran partikel, bahan baku yang digunakan, dan tingkat panas tertentu, yang menunjukkan bahwa hasil gas maksimum dapat diperoleh pada suhu tertentu kecuali bahan baku dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi menggunakan obor plasma (*plasma torch*).

**Tabel 5.** Pengaruh Temperatur Pada Proses Pirolisis Batubara Bituminus

	Temperatur (°C)		
	500	650	900
<b>Produk Yang Dihasilkan dan Recovery</b>			
Gas (wt%)	12,3	18,6	24,4
Likuid (wt%)	61,1	59,2	58,7
Arang Batubara (wt%)	24,7	21,8	17,7
Recovery (wt%)	98,1	99,6	100,8

Komposisi Gas dan HHV			
H <sub>2</sub> (mol%)	5,56	16,6	32,5
CO (mol%)	33,5	30,5	35,3
CO <sub>2</sub> (mol%)	44,8	31,8	18,3
CH <sub>2</sub> (mol%)	12,4	13,9	10,5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (mol%)	3,03	3,06	1,07
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (mol%)	0,45	2,18	2,43
HHV (MJ/m <sup>3</sup> )	12,3	15,8	15,1

Obor plasma dapat memanaskan bahan baku hingga mencapai suhu lebih dari 3000°C, mengubah kandungan organik menjadi gas dan kandungan anorganik menjadi terak kaca. Teknologi plasma menggunakan suatu "busur" pelepasan listrik untuk memanaskan gas ke suhu yang sangat tinggi, biasanya di atas 3000°C. Gas yang dipanaskan kemudian digunakan sebagai sumber panas untuk aplikasi tertentu. Dalam aplikasi pirolisis dan gasifikasi, jumlah oksigen dalam reaktor plasma harus dikontrol dengan hati-hati. Panas ekstrem yang dihasilkan dalam reaktor plasma dapat memecah bahan organik hingga menjadi komponen dasarnya, terutama unsur hidrogen, karbonmonoksida, dan karbondioksida.

#### 2.4. Produk Hasil Pirolisis

Seperti dalam pembahasan sebelumnya, proses pirolisis melibatkan pemecahan molekul kompleks menjadi beberapa molekul kecil. Produknya dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama:

1. Solid (karbon atau arang)
2. Likuid (air, hidrokarbon, dan tar)
3. Gas (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, dan gas lainnya)

Proporsi dari produk-produk ini tergantung pada beberapa faktor termasuk laju pemanasan dan suhu akhir yang dicapai oleh bahan bakar biomassa. Produk pirolisis tidak bisa disamakan dengan "bahan volatil" pada bahan bakar yang ditentukan dari hasil analisis *proximate*. Dalam analisis *proximate*, bahan cair dan gas yang dihasilkan sering dianggap sebagai "senyawa volatil," dan arang sebagai "karbon." Karena proporsi dari hasil pirolisis tergantung pada banyak faktor, penentuan senyawa volatil bahan bakar memerlukan penggunaan kondisi standar khusus seperti yang ditentukan dalam ASTM D-3172 dan D-3175. Prosedur yang ditetapkan dalam standar D-3175, misalnya, melibatkan pemanasan sampel bahan bakar tertentu dalam

tungku pembakaran pada suhu 950°C selama tujuh menit untuk mengukur bahan yang mudah menguap.

#### **2.4.1. Produk Solid**

Arang merupakan produk padat hasil pirolisis, yang tidak hanya mengandung karbon lebih dari 85%, tetapi juga mengandung unsur oksigen dan hidrogen. Tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa mengandung sangat sedikit abu anorganik. Nilai *Low Heating Value* (LHV) dari arang biomassa adalah sekitar 32 MJ / kg (Diebold dan Bridgwater, 1997), jauh lebih tinggi daripada bahan induknya atau produk cair yang dihasilkan.

#### **2.4.2. Produk Likuid**

Produk likuid atau cair, yang dikenal sebagai tar, *bio-oil*, atau *biocrude*, adalah cairan hitam yang mengandung hingga 20% air dan terutama sebagian besar terdiri dari senyawa fenolik homolog. *Bio-oil* adalah campuran senyawa hidrokarbon kompleks dengan sejumlah besar oksigen dan air. Sementara bahan baku biomassa memiliki LHV dalam kisaran 19,5 hingga 21 MJ / kg pada basis kering, hasil produk cairnya memiliki LHV lebih rendah, dalam kisaran 13 hingga 18 MJ / kg pada basis basah (Diebold et al., 1997).

*Bio-oil* diproduksi dengan cara depolimerisasi (proses penguraian senyawa organik) secara cepat dan simultan sehingga memecah komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin dari biomassa. Dalam proses yang umum, biomassa mengalami peningkatan suhu yang cepat diikuti oleh pendinginan secara langsung untuk "membekukan" produk pirolisis *intermediate*. Pendinginan cepat merupakan faktor penting, karena mencegah degradasi lebih lanjut, pembelahan, atau reaksi dengan molekul lain.

*Bio-oil* merupakan mikroemulsi, yang berarti fase kontinu adalah larutan encer hasil dari produk dekomposisi selulosa dan hemiselulosa, dan molekul kecil dari dekomposisi lignin. Fase terputus sebagian besar terdiri dari makromolekul pirolitik lignin (Piskorz et al., 1988). *Bio-oil* biasanya mengandung fragmen molekul selulosa, hemiselulosa, dan lignin polimer yang lolos dari proses pirolisis (Diebold dan Bridgwater, 1997). Berat molekul *bio-oil* yang terkondensasi dapat melebihi 500 Dalton (Diebold dan Bridgwater, 1997). Senyawa yang

ditemukan dalam *bio-oil* masuk ke dalam lima kategori luas berikut (Piskorz et al., 1988):

1. Hidroksialdehida
2. Hidroksiketon
3. Gula dan dehydrosugars
4. Asam karboksilat
5. Senyawa fenolik

### **2.4.3. Produk Gas**

Dekomposisi primer biomassa menghasilkan bahan gas yang dapat dikondensasikan (uap) dan gas yang tidak dapat terkondensasi (gas primer). Uap, yang terbuat dari molekul yang lebih berat, mengembun saat didinginkan, akan menambah hasil pirolisis cair. Campuran gas yang tidak terkondensasi mengandung gas dengan berat molekul lebih rendah seperti karbondioksida, karbon monoksida, metana, etana, dan etilena, yang semuanya tidak mengembun saat pendinginan. Gas tak terkondensasi tambahan diproduksi melalui proses peretakan sekunder uap yang disebut dengan gas sekunder. Produk gas akhir yang tidak terkondensasi dengan demikian merupakan campuran dari gas primer dan sekunder. LHV gas primer biasanya 11 MJ / Nm<sup>3</sup>, tetapi gas pirolisis yang terbentuk setelah proses peretakan sekunder uap mampu mencapai 20 MJ / Nm<sup>3</sup> (Diebold dan Bridgwater, 1997).

### **2.5. Jenis-Jenis Pirolisis**

Berdasarkan laju pemanasan, pirolisis dapat diklasifikasikan sebagai proses lambat dan cepat. Dianggap proses lambat jika waktu ( $t_{heating}$ ) yang diperlukan untuk memanaskan bahan bakar hingga mencapai suhu pirolisis jauh lebih lama dibandingkan waktu reaksi pirolisis ( $t_r$ ) dan sebaliknya. Hal tersebut berarti:

1. Pirolisis lambat,  $t_{heating} \geq t_r$
2. Pirolisis cepat,  $t_{heating} \leq t_r$

Klasifikasi tersebut dapat dinyatakan dalam laju pemanasan, dengan asumsi laju pemanasan adalah fungsi linier sederhana ( $T_{pyr}/t_{heating}, K/s$ ). Karakteristik waktu reaksi ( $t_r$ ) untuk satu reaksi dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari laju konstan ( $k$ ) yang diamati pada suhu pirolisis (Probstein dan Hicks, 2006).

Ada beberapa klasifikasi lain tergantung pada media dan tekanan di mana proses pirolisis dilakukan. Dengan kondisi pengoperasian yang spesifik, setiap proses memiliki produk dan aplikasi yang khusus. Dalam klasifikasi berikut, dua jenis pertama didasarkan pada tingkat pemanasan sedangkan yang ketiga didasarkan pada lingkungan atau media di mana pirolisis dilakukan:

1. Pirolisis lambat,
2. Pirolisis cepat, dan
3. Hidropirolisis

Pirolisis lambat dan cepat secara umum dilakukan tanpa media. Dua jenis lain dilakukan dalam media tertentu, *hydrous pyrolysis* menggunakan media H<sub>2</sub>O dan *hydroxyrolysis* menggunakan H<sub>2</sub>. Kedua Jenis ini terutama digunakan untuk produksi bahan kimia. Dalam pirolisis lambat, waktu tinggal uap di zona pirolisis adalah dalam satuan menit. Proses ini digunakan terutama untuk memproduksi arang dan dipecah menjadi dua jenis, yaitu karbonisasi dan konvensional. Dalam pirolisis cepat, waktu tinggal uap dalam satu detik atau milidetik. Jenis pirolisis ini, terutama digunakan untuk produksi *bio-oil* dan gas, terdiri dari dua jenis utama, yaitu *flash* dan *ultra-rapid*. Tabel di bawah membandingkan karakteristik proses pirolisis yang berbeda serta juga menunjukkan karbonisasi sebagai yang paling lambat dan *ultra-rapid* sebagai yang tercepat. Karbonisasi terutama menghasilkan arang; proses pirolisis cepat digunakan untuk memproduksi cairan atau gas.

**Tabel 6.** Karakteristik Beberapa Proses Pirolisis

Proses Pirolisis	Waktu Tinggal Uap	Laju Pemanasan	Temperatur Akhir (°C)	Produk Akhir
Karbonisasi	Hari	Sangat rendah	400	Arang
Konvensional	5 - 30 menit	Rendah	600	Arang, <i>bio-oil</i> , gas
Cepat	< 2 detik	Sangat Tinggi	±500	<i>Bio-oil</i>
<i>Flash</i>	< 1 detik	Tinggi	< 650	<i>Bio-oil</i> , zat kimia, gas
<i>Ultra-rapid</i>	< 0,5 detik	Sangat Tinggi	±1000	Zat kimia, gas
Vakum	2 - 30 detik	Sedang	400	<i>Bio-oil</i>
<i>Hydroxyrolysis</i>	< 10 detik	Tinggi	< 500	<i>Bio-oil</i>
<i>Methanopyrolysis</i>	< 10 detik	Tinggi	>700	Zat kimia

## Bab 3

# Perancangan Gasifier Biomassa

### 3.1. Pendahuluan

Desain sebuah sistem gasifikasi terdiri dari reaktor *gasifier* serta peralatan bantu atau pendukungnya. Desain instalasi gasifikasi biomassa umumnya terdiri dari sistem berikut:

1. Reaktor *gasifier*
2. Sistem penanganan bahan baku biomassa
3. Sistem *feeding* biomassa
4. Sistem pembersihan gas
5. Sistem pembuangan sisa abu atau produk padat

Bab ini akan membahas desain reaktor gasifier saja. Seperti halnya sebagian besar proses perancangan pabrik, desain gasifier dibagi menjadi tiga fase utama:

- Fase 1. Proses desain dan ukuran pendahuluan
- Fase 2. Optimalisasi desain
- Fase 3. Desain mekanik terperinci

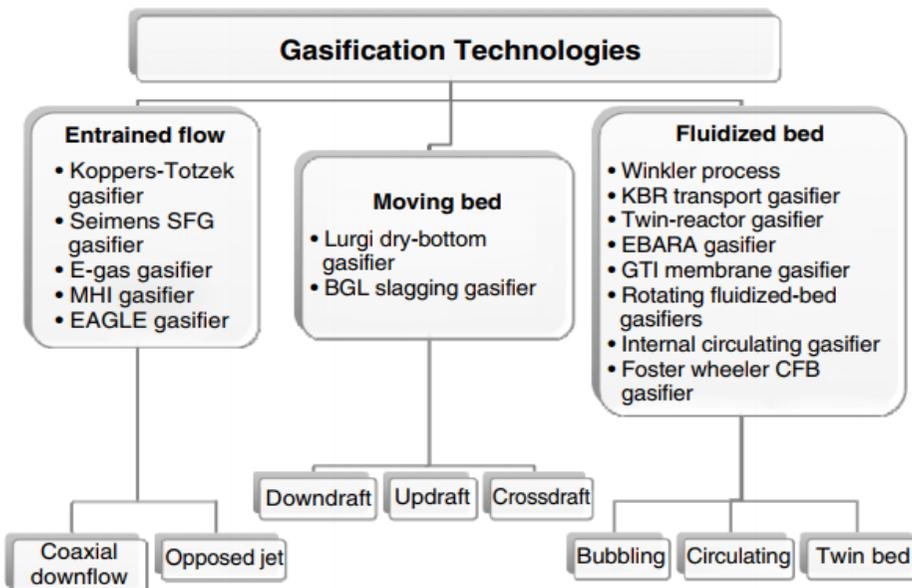
Untuk estimasi biaya dan/atau untuk hal pengajuan penawaran awal, sebagian besar pabrikan menggunakan langkah pertama untuk mengestimasi suatu *gasifier*. Langkah kedua hanya dipertimbangkan untuk sebuah proyek yang sudah pada tahap konfirmasi – yaitu, ketika pesanan dilakukan dan pabrikan sudah siap untuk tahap akhir dari desain mekanis atau pabrikasi yang terperinci. Bab ini membahas terutama menyangkut fase pertama dan, secara singkat juga membahas fase kedua (optimasi desain). Untuk menetapkan dasar bagi metodologi perancangan, deskripsi singkat tentang berbagai jenis *gasifier* juga disajikan, diikuti dengan diskusi tentang pertimbangan dalam masalah desain dan metodologi perancangan.

### 3.2. Jenis Gasifier

*Gasifier* diklasifikasikan terutama berdasarkan mode kontak antara bahan gas-solid dan media gasifikasi yang digunakan. Berdasarkan mode kontak gas-solid, *gasifier* secara luas dibagi menjadi tiga jenis utama (Tabel 6.1):

1. *Fixed/moving bed*,
2. *Fluidized bed*, dan
3. *Entrained flow*.

Ketiga kelompok tersebut masing-masing dibagi lagi menjadi beberapa jenis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1. Penyedia teknologi, terutama negara-negara barat, memasok teknologi gasifikasi berdasarkan salah satu dari jenis tersebut. Satu jenis jenis *gasifier* belum tentu cocok untuk kapasitas *gasifier* yang lengkap karena ada berbagai aplikasi yang sesuai untuk masing-masing. Misalnya, jenis *moving-bed* (*updraft* dan *downdraft*) digunakan untuk unit yang kecil antara 10 kWth-10 MWth, tipe *fluidized bed* lebih cocok untuk unit antara 5 MWth-100 MWth, dan jenis *entrained flow* digunakan untuk unit berkapasitas besar (> 50 MWth). Jenis *crossdraft gasifier* adalah yang memiliki ukuran terkecil sedangkan *entrained flow* adalah jenis *gasifier* berukuran terbesar.



Gambar 5. Klasifikasi Gasifier

### **3.3. Fixed-Bed/Moving-Bed Gasifier**

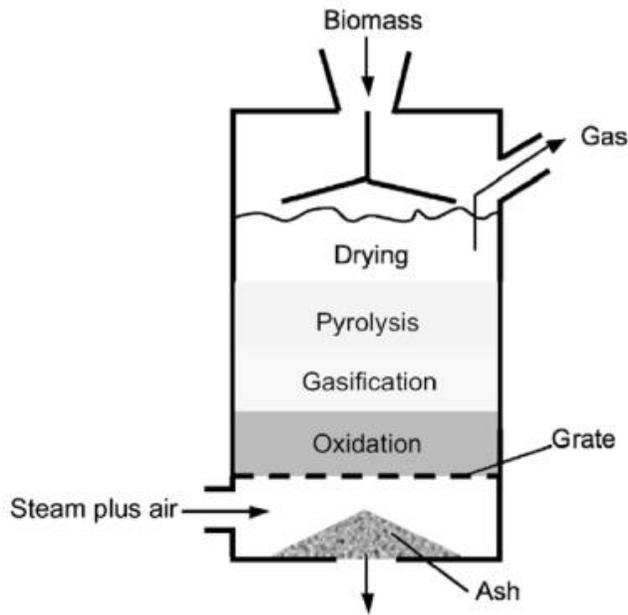
Pada *gasifier* jenis *entrained flow* dan *fluidized-bed*, media gasifikasi akan mengalirkan partikel bahan bakar melalui reaktor, tetapi dalam *gasifier fixed-bed* (juga dikenal sebagai *moving-bed*) bahan bakar tersebut disangga pada sebuah *grate*. Tipe ini juga disebut *moving-bed* karena bahan bakar bergerak turun dalam *gasifier* sebagai plug. *Gasifier fixed-bed* dapat dibangun dengan biaya murah dalam ukuran kecil, yang merupakan salah satu daya tarik utamanya. Untuk alasan ini, sejumlah besar skala kecil *gasifier* biomassa jenis *fixed-bed* digunakan di seluruh dunia.

Proses pencampuran dan perpindahan panas di dalam *gasifier fixed-bed* dapat dianggap buruk, yang membuatnya sulit untuk mencapai keseimbangan distribusi bahan bakar, suhu, dan komposisi gas yang seragam di seluruh penampang *gasifier*. Dengan demikian, bahan bakar yang rentan terhadap aglomerasi berpotensi membentuk aglomerasi selama proses gasifikasi. Inilah sebabnya mengapa *gasifier fixed-bed* tidak terlalu efektif digunakan untuk bahan bakar biomassa atau batubara dengan nilai *caking index* tinggi dalam unit kapasitas yang besar. Ada tiga jenis utama *gasifier fixed-bed* atau *moving bed* (perbedaan ketiganya ditunjukkan pada tabel di bawah):

1. Updraft,
2. Downdraft, dan
3. Crossdraft.

#### **3.3.1. Updraft Gasifiers**

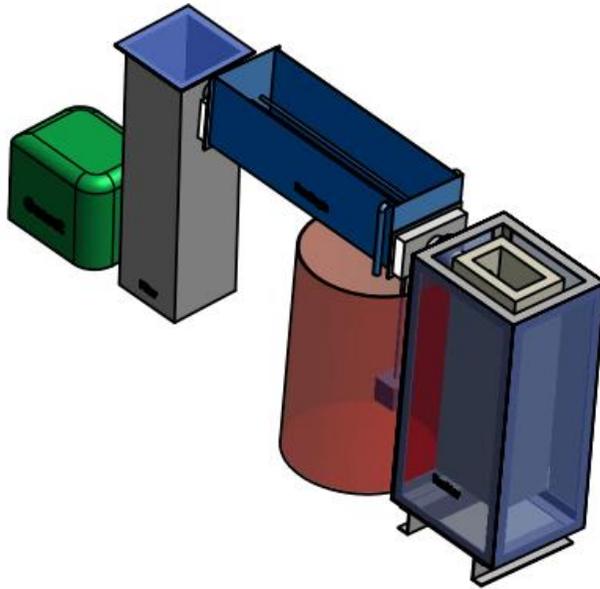
*Updraft Gasifier* adalah salah satu jenis yang tertua dan paling sederhana dari semua desain *gasifier* yang ada. Pada jenis ini, media gasifikasi yang digunakan (udara, oksigen, atau uap) bergerak ke atas sementara lapisan bahan bakar bergerak ke bawah, dan dengan demikian gas dan produk padat berada dalam arah yang berlawanan. Produk gas keluar dari atas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. Bahan media gasifikasi memasuki tempat tidur melalui parut atau distributor, di mana ia bertemu dengan lapisan abu panas. Abu jatuh melalui parut, yang sering membuat bergerak (berputar atau membalas), terutama dalam unit besar untuk memfasilitasi pembuangan abu.



Gambar 6. Sistem Updraft Gasifier

### 3.3.2. Pembuatan Prototipe Gasifier

Prototipe adalah contoh awal, model atau rilis produk yang dibuat untuk menguji konsep atau proses. Umumnya prototipe digunakan untuk mengevaluasi desain baru untuk meningkatkan akurasi analisis dan pengguna sistem. Ini adalah langkah antara formalisasi dan evaluasi ide. Prototipe adalah bagian penting dari proses desain dan praktik yang digunakan di semua disiplin ilmu desain. Mulai dari arsitek, perancang industri, dan bahkan perancang jasa, mereka membuat prototipe untuk menguji desain sebelum berinvestasi dalam produksi massal. Prototipe sering gagal saat diuji, dan ini menunjukkan perancang di mana cacat berada dan mengirim tim "kembali ke proses menggambar" untuk memperbaiki atau mengulangi solusi yang diusulkan berdasarkan umpan balik pengguna yang sebenarnya. Karena kegagalan terjadi lebih awal, prototipe menghindari pemborosan energi, waktu dan biaya dalam menerapkan solusi yang tidak tepat. Keuntungan lain dari pembuatan prototipe adalah, karena investasinya kecil, risikonya rendah.



**Gambar 7.** Desain 3D Reaktor Gasifier Tanpa Blower

Tujuan dari pembuatan prototipe gasifier adalah untuk memiliki model solusi yang nyata untuk masalah yang telah ditentukan dan dibahas selama tahap konsep / ide. Alih-alih melalui seluruh siklus desain berdasarkan solusi yang diharapkan, prototipe gasifier memungkinkan untuk dilakukan validasi terhadap konsep awal pembangkit listrik biomassa skala kerakyatan dengan mengumpulkan umpan balik berdasarkan data-data pada tahap pengujian. Jenis gasifier yang akan dibuat adalah jenis *updraft gasifier* yang merupakan salah satu jenis yang tertua dan paling sederhana dari semua desain gasifier yang ada. Pada jenis ini, media gasifikasi yang digunakan (udara, oksigen, atau uap) bergerak ke atas sementara lapisan bahan bakar bergerak ke bawah, dan dengan demikian gas dan produk padat berada dalam arah yang berlawanan.

### **3.3.3. Pengujian Prototipe Gasifier**

Tahap terakhir dari proses desain adalah pengujian prototipe, yang mengacu pada pengujian, konstruksi, dan solusi dari masalah desain. Pengujian dan verifikasi adalah bagian penting dari proses desain. Tanpa pengujian yang tepat di semua tahapan proses, mungkin terjadi beberapa kesalahan yang dapat berdampak pada pengambilan kesimpulan. Kegiatan pengujian dapat membawa perubahan desain,

dan juga membantu dalam menanggapi perubahan desain dengan memastikan kepatuhan terhadap persyaratan dipertahankan (Lévárdy et al. 2004). Namun, terlepas dari pentingnya pengujian dalam praktiknya, sebagian besar model proses desain tidak secara eksplisit menekankan aktivitas pengujian di seluruh pengembangan produk.

Tahap pengujian prototipe gasifier dilakukan untuk melihat kesesuaian parameter desain dengan produk yang telah dibangun serta memperhatikan kinerja reaktor gasifier dalam pembangkit tenaga listrik biomassa. Skema pengujian prototipe dapat dilihat pada diagram di bawah ini.



**Gambar 8.** Skema Pengujian Prototipe Gasifier

### **3.3.4. Karakteristik Tandan Kosong Kelapa Sawit**

Menurut Sanjaya, tandan kosong yang dihasilkan dari proses pengolahan ini sebanyak 23% dari jumlah TBS yang diolah. Tandan kosong dihasilkan dari sisa proses perebusan. Dari proses perebusan hanya akan diambil brondolan kelapa sawit, oleh karena itu brondolan dipisahkan dari tandannya. Tandan ini biasanya masih mengandung minyak, sehingga setelah dari unit sterilizer, tandan akan dibawa ke unit bunch press untuk di press sisa minyak yang tersisa dan direduksi ukurannya. Setelah melewati bunch press maka TKS akan menjadi limbah.

Tandan Kosong Sawit (TKS) merupakan salah satu limbah padat dari industri minyak kelapa sawit. Hasil analisis proximate dan ultimate menunjukkan bahwa tandan kosong sawit memiliki kandungan energi 17,08 MJ/kg sehingga dapat dikonversi menjadi sumber energi gas melalui proses gasifikasi. Kinerja gasifikasi sangat tergantung pada karakteristik bahan tandan kosong sawit antara lain ukuran bahan, kadar air dan pengaturan kapasitas udara serta kepadatan bahan. Sebagai bahan organik, tandan kosong sawit berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan organik, bahan baku serat, serta konversi menjadi bioenergi. Proses konversi menjadi bioenergi dapat dilakukan melalui gasifikasi dan pembakaran serta produksi bahan bakar cair seperti bioethanol.

### 3.4. Perancangan Gasifier

Proses perancangan gasifier tanpa blower melibatkan proses dan perangkat keras yang diperlukan. Proses perancangan memberikan jenis dan hasil gasifier, kondisi operasi, dan ukuran dasar reaktor. Perancangan perangkat keras melibatkan komponen struktural dan mekanik, seperti badan reaktor utama, isolasi, siklon, dan lain-lain, yang dikhususkan untuk jenis reaktor. Bagian ini berfokus pada perhitungan-perhitungan pada desain gasifier.

#### 3.4.1. Perhitungan Nilai Laju Konsumsi Bahan Bakar

Sesuai rencana penelitian, gasifier tanpa blower akan menghasilkan daya output ( $P_0$ ) sebesar 5 kw. Pada penelitian Sanjaya (2018), nilai *High Heating Value* (HHV) sebesar 15.22 MJ/kg dan efisiensi gasifikasi sebesar 48.22%. Berdasarkan nilai-nilai tersebut kita bisa mendapatkan nilai supply kebutuhan energi dengan menggunakan persamaan:

$$P_0 = \frac{FCR \times HHV \times \eta}{3.6}$$
$$FCR = \frac{P_0 \times 3.6}{HHV \times \eta} = \frac{5 \text{ kW} \times 3.6}{15.22 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 48.22\%} = 2.47 \text{ kg/jam}$$

Dari perhitungan di atas didapat nilai laju konsumsi bahan bakar sebesar 2.47 kg/jam. Kebutuhan tandan kosong kelapa sawit untuk rencana pemakaian selama 6 (enam) jam setara dengan 18 kg.

#### 3.4.2. Perhitungan Dimensi Reaktor

Dimensi utama dari tungku gasifier tipe updraft adalah tabung reaktor gasifikasi. Spesifikasi teknis yang disampaikan pada bagian sebelumnya digunakan untuk menentukan dimensi dan tinggi reaktor gasifikasi tipe updraft. Penampang reaktor dapat dibuat dengan berbagai geometri. Pada umumnya penampang silindrik yang banyak digunakan, akan tetapi pada penelitian kali ini akan mencoba membuat gasifier dengan penampang persegi panjang. Semakin besar diameter akan memberikan keluaran daya yang semakin besar pula. Dimensi penampang reaktor tungku ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$D = \sqrt{\frac{1.27 \times FCR}{SGR}}$$

Dalam penelitian Pranoto (2010), menggunakan nilai Laju gasifikasi spesifik (specific gasification rate),  $SGR = 80 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jam}$ . Sehingga dapat kita mencari luas penampang reactor dari:

$$D = \sqrt{\frac{1.27 \times FCR}{SGR}} = \sqrt{\frac{1.27 \times 2.47 \text{ kg/jam}}{80 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jam}}} = 0.198 \text{ m}$$

Dari perhitungan di atas jika penampang berbentuk silindris, kita mendapatkan nilai diameter reaktor sebesar  $0.198 \text{ m} = 19.8 \text{ cm}$ , atau jarijari sebesar  $r = 10 \text{ cm}$ . Atau luas penampang reaktor sebesar  $A = \pi r^2 = \pi \times 10^2 = 314 \text{ cm}^2$ . Karena penelitian ini menggunakan bentuk penampang persegi Panjang sehingga dicari panjang dan lebarnya dengan menggunakan acuan nilai luas penampang diatas. Pada penelitian ini menggunakan panjang 25 cm dan lebar 15 cm, sehingga didapat luas  $375 \text{ cm}^2$ .

Disamping luas penampang, perlu dicari juga ketinggian reaktor (h), dengan menggunakan persamaan:

$$h = \frac{t \cdot SGR}{\rho}$$

dimana diketahui nilai SGR yaitu  $80 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jam}$ . Dan nilai Densitas curah bahan bakar,  $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ . Waktu operasi gasifier (t) 1 jam. Sehingga bisa dicari ketinggian dari reaktor, sebagai berikut:

$$h = \frac{t \cdot SGR}{\rho} = \frac{1 \text{ jam} \times 80 \text{ kg/m}^2\cdot\text{jam}}{100 \text{ kg/m}^3} = 0.8 \text{ m} = 80 \text{ cm}$$

dari perhitungan diatas, didapatkan ketinggian reaktor gasifier adalah 80 cm, dengan ditambah ruang untuk peletakan pipa *output* sebesar 20 cm, sehingga tinggi total reaktor yaitu 100 cm.

### 3.4.3. Pembuatan Prototipe

Konstruksi prototipe gasifier adalah tahapan penelitian yang relatif sederhana dan dapat diselesaikan di bengkel yang dilengkapi peralatan yang baik menggunakan teknik perakitan untuk material logam dan pengelasan dasar. Tujuan pembuatan prototipe ini adalah

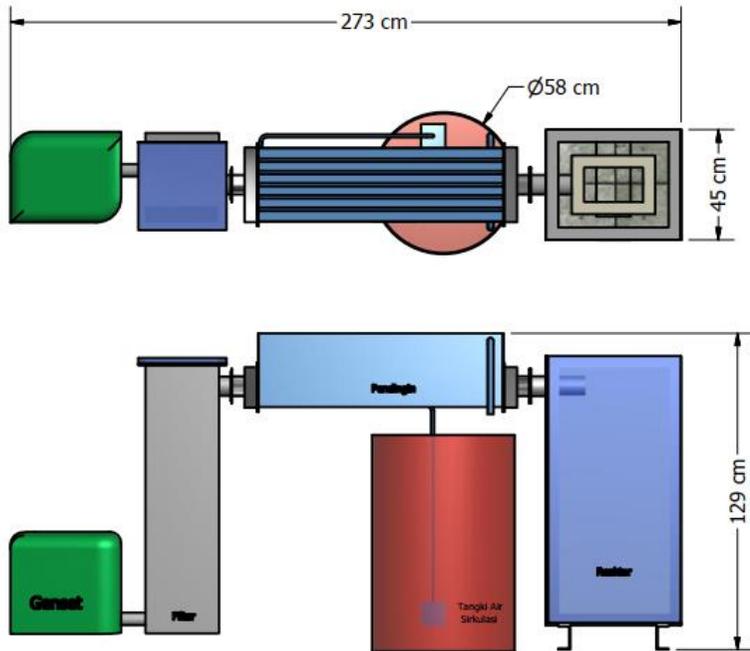
untuk melakukan pengujian kinerja gasifier tanpa blower yang diimplementasikan pada pembangkit listrik tenaga biomassa menggunakan tandan kosong sebagai bahan bakar untuk menghasilkan syngas.

*Gasifier* umumnya diproduksi menggunakan bahan-bahan yang tersedia secara komersial seperti pipa baja, lembaran, dan pelat. Saat proses pemilihan bahan, seseorang harus (jika mungkin) memilih bahan yang sudah tersedia dan menggunakan peralatan-peralatan yang tersedia dalam jumlah besar. Pembuatan prototipe gasifier harus menghindari paduan eksotis, bentuk khusus yang rumit, dan teknik fabrikasi khusus yang membutuhkan biaya penyiapan dan perkakas awal yang besar, kecuali jika alasan penggunaannya dapat dibenarkan. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian untuk membuat satu set reaktor gasifier tanpa blower, diantaranya :

- Semen tahan api
- Jarum semen api
- Bata tahan api
- Besi siku 6x6 cm
- Besi siku 4x4
- Plat stainless steel tebal 1mm
- Pipa ss seamless od 14mm tebal 1mm
- Pipa ss seamless od 25mm tebal 2mm
- Pipa ss od 50 mm
- Stopkran kuningan 2 inch
- Glasswool tebal 2.5 cm
- Elektroda ss 3.2 mm
- Elektroda ss 2 mm
- Drum besar
- Pompa air kecil, dll

Saat membangun prototipe gasifier, penting untuk menjaga penurunan tekanan dalam sistem gasifikasi sekecil mungkin. Karena ada penurunan tekanan yang tidak dapat dihindari terkait dengan gasifier, pemisah siklon, dan sistem pembersihan gas, sangat penting untuk menggunakan pipa dengan ukuran yang memadai. Penurunan tekanan yang terkait dengan jalur pipa standar ditunjukkan dalam banyak buku pegangan teknik dan perpipaan yang juga mencantumkan penurunan tekanan yang terkait dengan alat kelengkapan pipa seperti siku dan kopleng. Di sisi lain, laju aliran gas

di dalam pipa harus memadai sehingga senyawa padatan yang tertahan akan dibawa ke titik pembuangan yang tepat, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah daripada tersimpan di dalam pipa.



**Gambar 9.** Reaktor Dan Pembangkit Listrik Biomassa



**Gambar 10.** Prototipe Gasifier Tanpa Blower



**Gambar 11.** Proses pembuatan reaktor gasifier



**Gambar 12.** Proses pembuatan cooler



**Gambar 13.** Proses pembuatan filter

Mengembangkan gasifier biomassa memerlukan pemahaman mendalam tentang proses gasifikasi serta keterampilan teknis dalam pengelasan dan pembuatan logam. Proses gasifikasi sendiri adalah konversi biomassa menjadi gas sintetik melalui reaksi kimia pada suhu tinggi, yang memerlukan perancangan dan pembuatan reaktor yang tepat. Dengan mengikuti langkah-langkah detail yang telah dijelaskan, dapat membangun gasifier biomassa yang efisien dan mampu digunakan dalam berbagai aplikasi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik, bahan bakar mesin, dan pemanas industri. Selain itu, sangat penting untuk selalu mematuhi standar keselamatan kerja, mengingat pekerjaan ini melibatkan suhu tinggi dan potensi bahaya lainnya. Melakukan perawatan rutin juga sangat diperlukan untuk memastikan gasifier beroperasi pada kinerja optimal, mencegah kerusakan, dan memperpanjang umur pakai perangkat tersebut.

## Bab 4

# Hasil Pengujian Gasifier

### 4.1. Pendahuluan

Pengujian digunakan untuk tujuan yang berbeda, dan beberapa faktor berdampak pada bagaimana pengujian berlangsung selama proses pengembangan. Bagian ini fokus untuk mempertimbangkan bagaimana pengujian diperlakukan dalam beberapa model proses desain dan pengembangan yang sudah mapan. Tujuan pengujian prototipe gasifier tanpa blower adalah Metode pengujian kerja alat gasifier tanpa blower terdiri dari tahapan-tahapan berikut ini:

1. Biomassa diarangkan. Dipastikan kualitas arang yang dihasilkan bagus, karena akan mempengaruhi syngas yang akan dihasilkan. Ukuran arang dibuat sekitar 2-3 cm, seperti berikut:



**Gambar 14.** Arang Untuk Bahan Bakar

2. Memberi air pada tutup reactor sebagai isolator dan pengaman pembakaran, seperti pada gambar berikut:



**Gambar 15.** Air Isolator pada Reactor

3. Memastikan pipa pada cooler sudah terendam air semua. Dengan harapan, pendinginan akan bagus. Seperti pada gambar di bawah ini:



**Gambar 16.** Pipa Cooler Terendam Air

4. *Valve* pada filter dipastikan terbuka, untuk pengaman pembakaran.
5. *Valve* yang menuju ke genset dipastikan tertutup, untuk menghindari gas yang belum sempurna masuk ke ruang bakar genset



**Gambar 17.** Valve Pada Sistem Penyaringan

6. Membuat api/bara di reaktor sebelum bahan arang limbah kelapa sawit dimasukkan. Bisa dengan kertas atau kayu yang mudah terbakar, seperti pada gambar berikut
7. Jika bara/api sudah membesar, segera masukkan bahan arang limbah kelapa sawit ke dalam reaktor sedikit demi sedikit, sampai batas yang ditentukan, yaitu sekitar 5 cm di bawah pipa gas keluar.

8. Setelah itu, tutup reaktor pembakaran.



**Gambar 18.** Kondisi Api Dalam Reaktor

9. Cek secara berkala suhu di ruang bakar dengan menggunakan termogun. Temperature ruang bakar dipastikan sudah mencapai  $>800^{\circ}\text{C}$ .
10. Setelah suhu ruang bakar sudah diatas  $800^{\circ}\text{C}$ , syngas sudah mulai terbentuk dengan baik. Untuk mengetahui bisa dengan menyalakan syngas yang dihasilkan dari pipa di bagian atas filter, seperti pada gambar di bawah. Jika syngas sudah bisa dibakar dengan sempurna, menandakan *syngas* sudah siap dipakai di genset.



**Gambar 19.** Proses Gasifikasi Dalam Reaktor

11. Langkah selanjutnya, menyalakan genset dengan bahan bakar gasoline (bensin) sampai kecepatan putaran stabil. Setelah itu, kita atur 3 valve di pipa yang masuk ke genset, dengan perlahan membuka valve syngas dan menutup valve yang berasal dari karburator. Sampai kecepatan putaran genset stabil seperti waktu menggunakan bensin.



**Gambar 20.** Pipa Untuk Mengalirkan Syngas

12. Listrik yang dihasilkan oleh genset berbahan bakar syngas dari gasifier kini siap untuk dialirkan ke jaringan distribusi atau

digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik di lokasi tertentu. Proses ini mencakup konversi syngas, yang merupakan hasil gasifikasi biomassa, menjadi energi listrik melalui generator, memastikan pasokan listrik yang stabil dan berkelanjutan.

#### 4.2. Hasil Pengujian

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit. Peralatan lain yang digunakan adalah termometer laser untuk mengukur suhu di dalam reaktor, sepanjang pipa dan cooler. *Chipper* (pemotong biomassa), gergaji dan parang untuk memotong biomassa yang akan dijadikan sebagai bahan bakar. Generator set yang digunakan dalam proses pengujian adalah Genset yamakoyo GFH 4500 dengan spesifikasi ditunjukkan pada tabel di bawah.

**Tabel 7.** Spesifikasi Generator Set

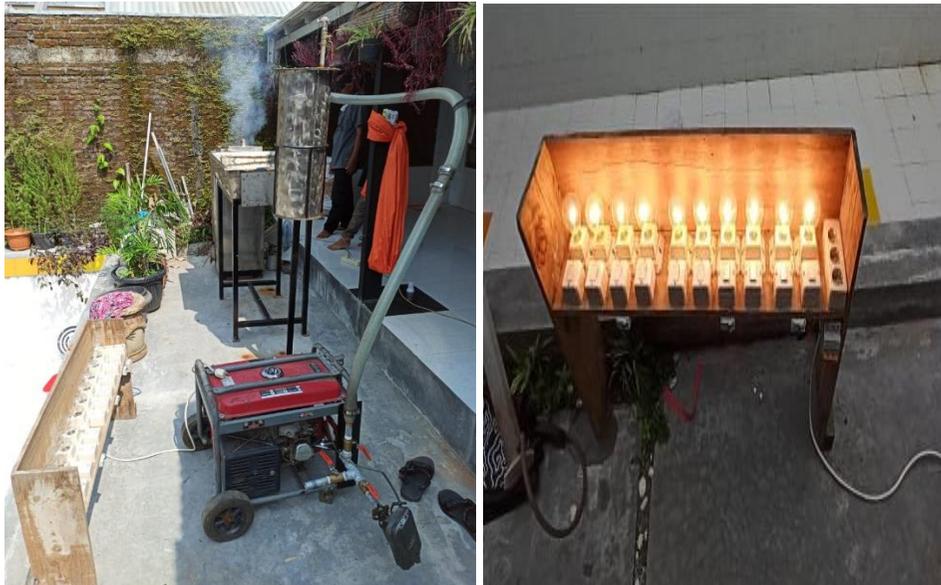
AC voltage	220 V
AC Output	2700 watt
DC Output	12 V
Frequency	50 Hz
Phase	Single

Pengujian tahap pertama dilakukan secara langsung dengan memanfaatkan syngas hasil produksi gasifier untuk mengoperasikan sebuah genset yang diberi beban. Dalam pengujian ini, beban listrik yang digunakan adalah 20 bola lampu pijar dengan kapasitas masing-masing 100 watt.



**Gambar 21.** Genset Yamakoyo GFH 4500

Reaktor yang dibuat mampu digunakan untuk arang sebanyak 15 kg. Pada percobaan terakhir kita mencoba menggunakan arang sebanyak 12 kg dan kita operasikan selama 3 jam dengan menyambungkan lampu pijar sebanyak 20 unit, dengan kapasitas daya masing-masing 100 watt.



**Gambar 22.** Pengujian Reaktor Pada Pembangkit Listrik

Pengujian pembangkit listrik tenaga biomassa pada pengujian menggunakan reaktor gasifier tanpa blower dan generator set Yamakoyo GFH 4500 pada percobaan terakhir genset hanya mampu menyalakan lampu sebesar 1000 watt.

Pada tahapan berikutnya masih dibutuhkan pengujian terhadap kinerja gasifier agar listrik dihasilkan mampu mencapai 5 kW dan kadar tar semakin rendah. Beberapa hal untuk pengembangan tahap berikutnya adalah:

1. Pengujian menggunakan genset dengan kapasitas yang lebih besar.
2. Pengujian menggunakan genset diesel,
3. Beberapa kebocoran disaluran yang teridentifikasi pada pengujian tahap pertama akan diperbaiki.

4. Pada komponen filter, masih terdapat uap air dari arang yang masih basah masuk ke dalam saluran sehingga pada tahap berikutnya hal ini harus dihindari.

# Daftar Pustaka

- [1] J. Rezaian dan N. . P. Cheremisinoff, *Gasification Technologies A Primer for Engineers and Scientists*, Florida: CRC Press, 2005.
- [2] C. Higman dan M. v. d. Burgt, *Gasification*, Massachusetts: Gulf Professional Publishing, 2003.
- [3] P. Quaak, H. Knoef dan H. E. Stassen, *Energy From Biomass : A Review of Combustion and Gasification Technologies*, Washington, D.C.: World Bank, 1999.
- [4] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis*, Massachusetts: Academic Press, 2010.
- [5] W. Pramita, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Berbahan Limbah Cair Kelapa Sawit," Universitas Sultan Syarif Kasim, Riau, 2018.
- [6] A. Pratoto, A. Sutanto, E. H. Praja dan D. Armenda , "Rancang Bangun Tungku Gasifier Untuk Pemanfaatan Tandan Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi," dalam *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9*, Palembang, 2010.
- [7] F. H. Prima, "Potensi Biomassa dan Produksi Energi Tanaman Gamal (*Gliricidia Sepium*) Sebagai Bahan Baku Energi Alternatif Di Kabupaten Timor Tengah Utara Provinsi Nusa Tenggara Timur," Institut Pertanian Bogor, Bogor, 2017.
- [8] B. Purwantana dan B. Prastowo, "Gasifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit: Konversi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan," dalam *Seminar Nasional Inovasi Perkebunan*, Jakarta, 2011.
- [9] D. Sanjaya , D. Notosudjono dan D. B. Fiddiansyah, "Perencanaan Gasifikasi Limbah Kelapa Sawit Sebagai Energi Alternatif Di PTPN VIII Cikasungka Kabupaten Bogor," *Jurnal Online Mahasiswa Bidang Teknik Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, 2018.
- [10] K. Siregar, "Rancang Bangun Gasifier Downdraft dan Aplikasi PLT-Biomassa Kapasitas 50 kW Untuk Daerah Terisolasi Dari Jaringan Listrik PLN," dalam *Seminar Nasional FTIP UNPAD PERTETA HIPI*, Bandung, 2014.

- [11] Z. Yurnaidi, "Opportunities and Challenges of Renewable Energy and Distributed Generation Promotion for Rural Electrification in Indonesia," dalam *Zero-Carbon Energy Kyoto 2009*, Tokyo, Springer, 2010, pp. 102-107.
- [12] S. Madelli, J. Barbieri, R. Mereu dan E. Colombo, "Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1621-1646, 2016.

