

## ULASAN: PEMBANGUNAN TEKNOLOGI PENGKASAN DAN PENGGUNAAN

## REVIEW: DEVELOPMENT OF GASIFICATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

Muhammad Roslan Rahim<sup>a</sup>, Annisa Palupi Trisasongko<sup>a</sup>,  
Mohammad Nazri Mohd Jaafar<sup>a\*</sup>, Norazila Othman<sup>a</sup>, Yahaya  
Ramli<sup>a</sup>, Muhammad Syahiran Abdul Malik<sup>a</sup>, Mazlan Said<sup>b</sup>

<sup>a</sup>School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor,  
Malaysia

<sup>b</sup>Institute for Vehicle Systems and Engineering, Universiti Teknologi  
Malaysia, 81310 UTM Johor Bahru, Johor, Malaysia

### Article history

Received  
23 September 2021  
Received in revised form  
18 October 2021  
Accepted  
22 November 2021  
Published Online  
20 December 2021

\*Corresponding author  
nazri@mail.fkm.utm.my

### Graphical abstract



### Abstract

Gasification technologies have the potential to produce clean and efficient energy sources. This technology is capable of producing synthesis gas from low or negative carbon-based raw materials such as coal, petroleum coke, high sulfur fuel oil, waste or waste materials and biomass. The gas produced from the process is used to replace natural gas to generate electrical power, or acts as basic raw material for producing chemicals and liquid fuels. Gasification is a process which utilizes heat, pressure, and steam to convert materials directly into gases, such as carbon monoxide and hydrogen gases. Despite differing in various aspects, gasification technologies have four common engineering factors such as atmospheric gasification reactors (oxygen or air content level), internal and external heating, reactor design and operating temperature. Raw materials, either in dry form or small granules, are fed into the reactor chamber called gasifier. Raw materials subjected to heat, pressure as well as an environment with rich or low oxygen content. Hydrocarbon gas (also known as Syngas), liquid hydrocarbon (oil) and coal (carbon black and ash) are the three main products of gasification. Syngas can be used as a fuel to produce electricity or steam, or acts as a basic block for various types of chemicals. When mixed with air, Syngas can be used in petrol or diesel engines with slight modifications to the engine.

**Keywords:** Gasification, synthesis gas, engineering factors, raw material, main product

### Abstrak

Teknologi pengkasan berpotensi menghasilkan sumber tenaga bersih dan cekap. Teknologi ini berkeupayaan menghasilkan gas sintesis daripada bahan mentah berasaskan karbon bernilai rendah atau negatif seperti arang batu, kok petroleum, minyak bahan api bersulfur tinggi, bahan buangan atau sisa dan biojisim. Gas yang dihasilkan daripada proses tersebut digunakan menggantikan gas asli, bertujuan menjana kuasa elektrik, atau sebagai bahan mentah asas untuk menghasilkan bahan kimia dan bahan api cecair. Pengkasan merupakan proses yang menggunakan haba, tekanan, dan wap untuk mengubah bahan secara langsung menjadi gas, seperti gas karbon monoksida dan hidrogen. Teknologi pengkasan mempunyai perbezaan dalam pelbagai aspek namun terdapat empat faktor kejuruteraan yang menjadi teras kepada sistem pengkasan seperti reaktor pengkasan atmosfera (tahap kandungan oksigen atau udara), pemanasan dalaman dan luaran, reka bentuk reaktor dan suhu operasi. Bahan mentah yang digunakan, disediakan dan dimasukkan dalam bentuk kering atau butiran kecil, ke ruang reaktor yang disebut sebagai pengkas. Bahan mentah mengalami

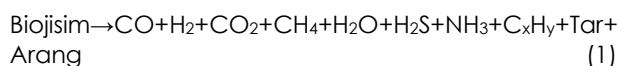
keadaan panas, tekanan serta persekitaran yang kaya atau rendah dengan kandungan oksigen di dalam penggasaan. Terdapat tiga produk utama dari proses penggasaan iaitu gas hidrokarbon (juga disebut singas), cecair hidrokarbon (minyak) dan arang (karbon hitam dan abu). Singas dapat digunakan sebagai bahan api untuk menghasilkan tenaga elektrik atau wap, sebagai blok asas untuk pelbagai jenis bahan kimia. Apabila bercampur dengan udara, singas dapat digunakan dalam enjin petrol atau diesel dengan sedikit pengubahsuaian pada enjin.

*Kata kunci:* Penggasaan, gas sintesis, faktor kejuruteraan, bahan mentah, produk utama

© 2022 Penerbit UTM Press. All rights reserved

## 1.0 PENGENALAN

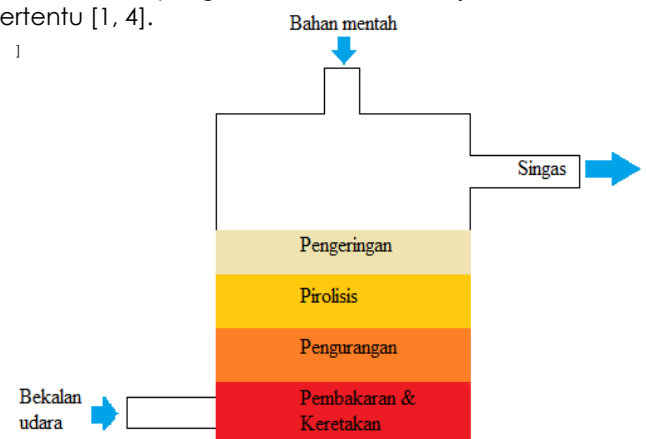
Penggasaan merupakan proses penukaran termokimia bahan api berkarbon menjadi bahan api gas pada suhu tinggi, ia melibatkan pengoksidaan separa unsur bahan api dalam bahantara penggasaan seperti udara, oksigen atau wap. Hasil daripada proses penggasaan adalah gas sintesis (singas) yang terdiri daripada hidrogen ( $H_2$ ), karbon monoksida (CO), karbon dioksida ( $CO_2$ ), nitrogen ( $N_2$ ), wap air ( $H_2O$ ), metana ( $CH_4$ ), hidrokarbon dan bahan cemar. Secara umumnya, penggasaan merupakan kaedah transformasi separa atau keseluruhan bahan api pepejal menjadi gas dengan cara nyahruap dan pengoksidaan di mana keduanya merupakan bahagian yang terpenting dalam kaedah ini [1]. Proses penggasaan terdiri daripada lima proses terma yang berbeza iaitu pengeringan, pirolisis, pembakaran, keretakan dan pengurangan seperti yang digambarkan dalam Rajah 1. Pembentukan tar boleh ditambahkan sebagai langkah untuk menghasilkan hidrokarbon ringan dari molekul tar yang besar. Persamaan 1 di bawah menunjukkan tindak balas proses penggasaan [2].



Proses pengeringan merupakan proses penyingkiran kelembapan yang terdapat dalam bahan mentah biojisim. Kandungan kelembapan bahan mentah adalah sekitar 5 hingga 35% dan ia dikeluarkan bertujuan untuk meningkatkan kualiti penghasilan singas dan prestasi sistem penggasaan [3]. Pada suhu melebihi 100 °C hingga 150 °C, kandungan air di dalam bahan mentah biojisim didapati akan meruap. Dalam proses pengeringan ini, bahan api biojisim tidak mengalami sebarang penguraian.

Proses nyahruap atau dikenali sebagai pirolisis merupakan proses penguraian terma biojisim dengan ketiadaan oksigen, di mana komponen mudah meruap pada bahan mentah pepejal berkarbon mengewap dalam tindak balas primer dengan pemanasan, serta meninggalkan sisa yang terdiri daripada arang dan abu. Pada dasarnya proses ini merupakan proses menghilangkan

hidrogen dan oksigen dari pepejal, sehingga arang yang tersisa terdiri daripada karbon. Dalam proses nyahruap, pelbagai komposisi gas dihasilkan, dan gas-gas ini dihasilkan oleh hidrogen dan karbon yang terdapat dalam sisa. Komposisi kimia bahan api biojisim dan keadaan operasi mempengaruhi nisbah produk. Setelah suhu meningkat pada kira-kira 700 °C, tahap ini menentukan reaksi keretakan terma dan penukaran haba serta jisim, termasuk gas ringan seperti  $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ , dan  $NH_3$ , tar (wap hidrokarbon terkondensasi), dan arang (sisa yang dihasilkan selepas proses nyahruap). Wap yang dihasilkan pada keadaan ini mengalami keretakan haba kepada gas dan arang. Dalam kes ini, kandungan karbon dan hidrogen yang tinggi, didapati mudah diubah menjadi gas yang mudah terbakar dalam keadaan meruap, dan turut dikelaskan sebagai bahan mentah. Kuantiti, komposisi, dan ciri spesies kimia yang dibebaskan disebabkan oleh proses nyahruap bergantung kepada beberapa faktor seperti komposisi dan struktur asal sisa, suhu, tekanan, dan kadar pemanasan yang dikenakan oleh jenis reaktor tertentu [1, 4].



Rajah 1 Proses penggasaan dari sistem penggas alir bebas atas [5]

Pembakaran merupakan satu-satunya proses eksotermik dari lima proses penggasaan yang berlaku pada suhu 800°C hingga 1200°C. Keseluruhan haba yang mendorong kepada berlakunya proses pengeringan, pirolisis, dan pengurangan dihasilkan sama ada secara langsung, atau tidak langsung dari

proses pembakaran melalui proses pertukaran haba yang berlaku dalam penggas. Pembakaran boleh dijana menggunakan gas tar atau arang dari proses pirolisis, dan penggunaannya bergantung kepada jenis reaktor yang berbeza, ada yang menggunakan salah satu atau kedua-duanya. Dalam sistem penggas alir bebas bawah, pembakaran gas tar dari proses pirolisis adalah bertujuan untuk menghasilkan haba bagi menjalankan proses pengurangan, sepertimana  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  bertujuan untuk penurunan dalam proses pengurangan. Matlamat utama pembakaran dalam penggas alir bebas bawah adalah untuk mendapatkan pencampuran yang baik dan suhu yang tinggi sehingga semua tar yang terbentuk terbakar atau retak, serta tidak akan hadir bersama gas yang dikeluarkan. Proses pengurangan dan pembentukan arang dilihat sedikit sebanyak menyumbang kepada penukaran tar menjadi gas bahan api yang boleh digunakan. Penyelesaian terhadap masalah tar ini kebanyakannya adalah berdasarkan masalah keretakan tar di zon pembakaran.

Keretakan merupakan proses memecahkan molekul kompleks besar seperti tar menjadi gas yang lebih ringan dengan cara didedahkan kepada haba. Proses ini sangat penting untuk penghasilan gas bersih yang bersesuaian dengan enjin pembakaran dalaman, kerana gas tar yang terkondensasi akan menjadi tar melekit dan dengan cepat akan merosakkan injap enjin. Keretakan juga diperlukan untuk memastikan pembakaran yang betul kerana pembakaran lengkap hanya berlaku apabila gas yang mudah terbakar bercampur dengan oksigen. Dalam proses pembakaran, suhu tinggi yang dihasilkan berkeupayaan menguraikan molekul tar besar yang melalui zon pembakaran.

Proses pengurangan merupakan proses pembakaran pembalikan langsung yang berlaku pada suhu  $650^\circ\text{C}$  hingga  $900^\circ\text{C}$ . Proses pengurangan bertindak sebagai penyingkiran atom oksigen dari produk buangan pada suhu tinggi untuk menghasilkan gas yang mudah terbakar. Haba diperlukan semasa proses pengurangan, oleh itu suhu gas akan menurun. Apabila biojisim digunakan sebagai bahan mentah semasa proses penggasan, langkah pertama proses tersebut adalah penguraian termokimia komponen lignoselulosa dengan pengeluaran arang dan jirim meruap. Sekiranya penggasan lengkap berlaku, semua karbon dibakar atau dikurangkan menjadi karbon monoksida, dan beberapa bahan mineral lain mengalami sejatan. Sisa-sisa itu terdiri daripada beberapa arang (karbon tidak terbakar) dan abu [6].

## 2.0 TEKNOLOGI PENGGASAN

Teknologi penggasan merupakan teknologi yang diberi perhatian serta sentiasa dikaji oleh pihak industri dan para saintis selama beberapa dekad [7]. Teknologi ini juga dilihat turut mengalami pasang surut akibat persaingan dengan teknologi lain, yang

dilihat jauh lebih stabil dan matang. Terdapat pelbagai jenis teknologi pemprosesan yang dibangunkan untuk tujuan memproses bahan api yang berbeza serta dibangunkan dengan kaedah yang lebih canggih dan berbeza bagi memenuhi kehendak terkini. Bagi penggasan, prestasi sistem ini sering diukur dari segi waktu pengoperasian yang dicapai per dengan tahun. Namun sejak akhir-akhir ini, pengukuran prestasi sistem penggasan diukur bertujuan untuk menilai keupayaan waktu pengoperasian iaitu sekitar 8000 jam setahun bagi melihat kemampuan untuk terus beroperasi tanpa henti. Kemajuan sistem ini amat lembab daripada yang dijangkakan tetapi fungsi sistem ini dilihat telah pun memasuki pasaran, terutamanya untuk aplikasi bersaiz kecil dan sederhana. Secara umumnya teknologi penggasan ini dapat dibahagikan secara sistematik kepada 3 bahagian iaitu:

- Skala kecil: penggas lapisan tetap dan proses berperingkat untuk pengeluaran haba dan kuasa gabungan (CHP).
- Skala sederhana: penggas lapisan terbendalir dan proses lapisan terbendalir berkembar untuk pengeluaran CHP dan singas (proses metanasi yang lebih lanjut dan sunfikan ke dalam grid gas).
- Skala besar: pengeluaran singas dalam reaktor lapisan terbendalir mengeliling yang lebih besar atau penggas aliran teriring, penggasan bersama bahan mentah biojisim dengan bahan api fosil.

Pada dasarnya setiap satu jenis teknologi penggasan tertentu didapati tidak sesuai untuk digunakan dalam kepelbagaian kesemua aplikasi. Setiap teknologi penggasan memiliki tahap kesesuaian dan julatnya yang tersendiri yang boleh dikatakan unik, sebagai contoh seperti teknologi lapisan terbendalir mempunyai julat  $> 10\text{MW}$  manakala penggas aliran teriring pula mempunyai julat  $> 100\text{MW}$  [7, 5].

### 2.1 Jenis-jenis Penggas dalam Proses Penggasan

Jenis reaktor penggas yang sesuai digunakan untuk proses penggasan biojisim, adalah seperti penggas lapisan tetap dan penggas lapisan terbendalir, ianya berdasarkan hubung kait pergerakan antara pepejal dan gas serta ketumpatan pukal bagi fasa pepejal dalam reaktor. Jenis-jenis penggas yang terdapat pada masa kini ialah, penggas lapisan tetap alir bebas bawah atau searus, penggas lapisan tetap alir bebas atas atau arus berlawanan, penggas lapisan tetap alir bebas silang, penggas lapisan terbendalir gelembung dan penggas lapisan terbendalir mengeliling atau cepat. Sebagai tambahan terdapat juga penggas dari jenis teriring dan konsep penggas lapisan terbendalir reaktor berkembar [8].

#### 2.1.1 Penggas Lapisan Tetap

Dalam penggas lapisan tetap, bahan api diletakkan di atas jeriji besi, di mana bahan api yang

dimasukkan akan bertindak sebagai palam. Penggas jenis ini kebiasaannya sesuai untuk pengoperasian skala kecil dalam julat antara 10kW hingga 10 MW. Jadual 1 menunjukkan tiga jenis teknologi penggas lapisan tetap serta perbandingannya.

**Jadual 1** Perbandingan tiga jenis teknologi penggas lapisan tetap, diadaptasi dari [9]

Bahan api (kayu)	Penggas alir bebas atas	Penggas alir bebas bawah	Penggas alir bebas silang
Kelembapan asas basah (%)	<602	<25	10-20
Abu kering asas (%)	<252	<6	0.5-1.0
Suhu lebur abu (°C)	>1000	>1250	
Saiz bahan api (mm)	5-100	20-100	5-20
Julat penggunaan (MW)	2-30	1-2	
Suhu gas keluar (°C)	200-400	700	1250
Tar (g/Nm <sup>3</sup> )	30-150	4.5-5.0	4.0-4.5
Gas LHV (MJ/m <sup>3</sup> N)	5-6	85-90	75-90
Kecekapan gas panas (%)	90-95	3-4	2-3

### Penggas Lapisan Tetap Alir Bebas Atas

Di dalam penggas ini laluan bagi bahan mentah dan agen penggasan seperti oksigen, udara dan wap didapati berlaku secara berlawanan arah. Julat saiz zarah bagi bahan mentah yang digunakan dalam penggas ini selalunya sekitar 2 hingga 50 mm. Penggas ini beroperasi pada julat tekanan antara 0.15 hingga 2.45 MPa dan masa mastautin pula adalah sekitar 15 hingga 30 minit [10]. Masa mastautin pembakaran yang panjang adalah bertujuan untuk mencapai tindak balas penggasan penuh bagi menghasilkan pengeluaran dan kecekapan yang rendah [11].

Kelemahan terbesar pengeluaran gas dari penggas jenis ini adalah berlakunya pembentukan tar pada tahap yang tertinggi iaitu sekitar 10 hingga 20 peratus berat, di mana ia memerlukan kepada pasca pembersihan yang intensif. Tar dan sebatian beroksigen dihasilkan dari proses penggasan yang bersuhu rendah.

Penggas jenis ini mempunyai kelebihan menghasilkan abu singas yang rendah kerana suhu yang dihasilkan agak tinggi di bahagian bawah reaktor pada titik pelepasan abu. Namun produk singas daripada penggas ini didapati mempunyai kadar kandungan tar yang tinggi serta tidak digalakkan untuk aplikasi enjin, walau bagaimanapun ianya lebih sesuai untuk aplikasi terma [12].

Penggas jenis ini boleh menerima pelbagai jenis bahan mentah yang digunakan. Obernberger dan rakan-rakan [12] melakukan ujian prestasi pada

habuk papan dan isirong kelapa sawit, hasilnya menunjukkan tenaga haba masukan adalah masing-masing dengan nilai 28 kJ dan 32 kJ, manakala kuasa masukan pula adalah 7.8 kW dan 8.79 kW, selain itu kuasa keluaran pula didapati sebanyak 5.47 kW dan 6.15 kW, dari segi kecekapan penggasan pula masing-masing adalah 93 dan 67.4 peratus. Berdasarkan kajian ini mendapati bahawa habuk papan dan isirong kelapa sawit adalah bahan mentah yang sesuai untuk digunakan pada penggas ini. Rajah 1 di atas menunjukkan sistem penggas alir bebas atas sewaktu operasi penggasan dijalankan.

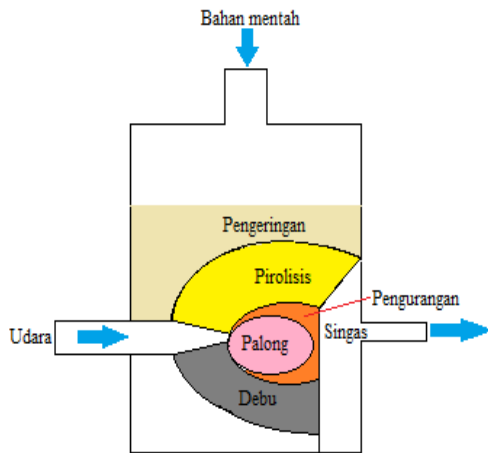
### Penggas Lapisan Tetap Alir Bebas Bawah

Penggas ini merupakan reaktor yang berfungsi dengan udara penggasan primer yang disuntik di kawasan pengoksidaan atau di atas kawasan tersebut di dalam reaktor. Kebiasaannya penggas ini digunakan untuk penggasan bahan api yang mempunyai kadar meruap yang tinggi seperti kayu dan biojisim [5]. Pepejal dan wap yang dihasilkan dari zon pirolisis bertindak balas pada bahagian kerongkong penggas dengan udara tambahan yang menyokong penggasan bahan mentah pada tekanan atmosfera [13]. Tindak balas penggasan ini berlaku di kawasan pengecutan. Agen penggasan disebarkan secara homogen pada zon pengoksidaan iaitu di bahagian kerongkong penggas, manakala suhunya dikawal sekitar 1000 °C. Keperluan terhadap bahan mentah bagi penggas ini bergantung kepada ukuran kerongkong penggas. Julat saiz zarah untuk bahan mentah yang digunakan biasanya sekitar 1 hingga 30 cm. Keterbatasan saiz fizikal zarah membawa kepada had maksimum adalah sekitar 500 kg/jam atau kapasiti sekitar 500 kWe (kilowatt-elektrik) [14]. Ukuran dan saiz kerongkong merupakan penghalang utama untuk proses peningkatan skala, oleh hal yang demikian penggas ini tidak sesuai digunakan pada bahan mentah yang berskala besar [15].

Penggas jenis ini sesuai untuk menukarkan bahan mentah biojisim yang memiliki kadar ruapan yang tinggi kepada bahan api yang boleh digunakan untuk menjana kuasa [16]. Bahan mentah yang digunakan untuk proses penggasan ini mestilah agak kering, terhad kepada 30% kelembapan dan memiliki kadar kandungan abu yang rendah (<1% berat) [17]. Jirim meruap yang tinggi didapati lebih cepat untuk mengewap dan ianya boleh dinyalakan dengan pantas. Jirim meruap yang sangat reaktif dalam zon pengoksidaan amat penting untuk penggunaan pembakaran.

Suhu tinggi di bahagian keluaran penggas membolehkan penghasilan tar yang rendah iaitu kurang dari 0.5 g/m<sup>3</sup> [18]. Dengan menggunakan enjin pembakaran dalam, kandungan tar yang rendah daripada penggas ini menjadikannya amat sesuai untuk penjana elektrik berskala kecil [15]. Penggas jenis ini sesuai digunakan untuk bahan mentah yang mempunyai kadar kelembapan yang

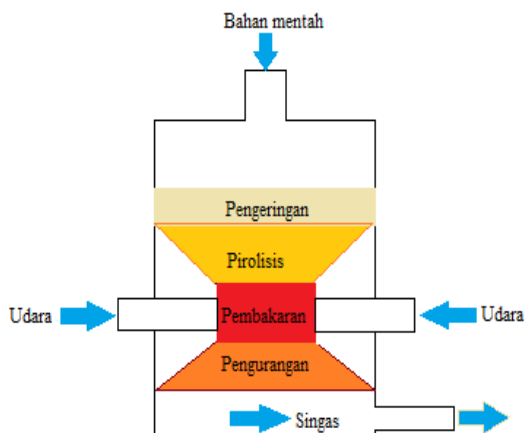
rendah seperti kulit kacang, miscanthus, pinus, sekam padi dan jerami gandum [15, 18]. Rajah 2 menunjukkan sistem penggas lapisan tetap alir bebas bawah.



Rajah 2 Sistem penggas alir bebas bawah [6]

### Penggas Lapisan Tetap Alir Bebas Silang

Penggas ini turut dinamai sebagai penggas lapisan tetap searus, di mana bahan api turut dimasukkan dari atas, manakala udara pula dimasukkan dari sisi. Perbezaan penggas ini daripada penggas lapisan tetap yang lain ialah produk singas dikeluarkan bertentangan dengan bahagian masukan udara. Rajah 3 menunjukkan sistem penggas ini. Udara dimasukkan ke dalam reaktor pada halaju tinggi bagi menghasilkan zon panas atau dikenali sebagai palong, dengan suhu melebihi 1500°C disebabkan pembakaran bahagian arang. Baki arang yang tertinggal akan melalui proses penggasan di zon berikutnya. Haba dari pembakaran digunakan pada zon pirolisis, di mana biojisim akan dipirolisis apabila melalui zon ini. Penggas ini selalunya digunakan pada unit berskala kecil dan pembangunan reaktor biasa disebabkan zon pembakaran yang kecil dan kesan penambat bahan api serta abu. Disebabkan suhu yang tinggi, pembentukan tar adalah rendah [5].



Rajah 3 Sistem penggas alir bebas silang [6]

### 2.1.2 Penggas lapisan Terbendalir

Secara asasnya konfigurasi penggas lapisan terbendalir adalah berdasarkan prinsip pembendaliran, dengan memaksa aliran gas (medium pembendaliran) melalui reaktor, bahan api bersama dengan bahan lapisan lengai akan bertindak seperti bendalir, sekiranya halaju aliran berada pada tahap yang cukup tinggi. Campuran udara, wap atau wap/oksigen adalah contoh medium pembendaliran yang biasa digunakan. Pasir silika pula adalah bahan lapisan yang kerap kali digunakan, tetapi pepejal pukal lain, terutama yang menunjukkan aktiviti pemangkin, seperti pasir olivin dan dolomit, juga turut digunakan.

Penggas lapisan terbendalir mempunyai banyak ciri-ciri yang tidak terdapat pada penggas jenis lapisan tetap, termasuk kadar pemindahan haba dan jisim yang tinggi serta pencampuran fasa pepejal yang baik, bermaksud bahawa kadar tindak balas tinggi dan suhu adalah lebih atau kurang seragam di dalam lapisan.

Bergantung kepada halaju medium pembendaliran, penggas lapisan terbendalir dibahagikan kepada dua kategori iaitu penggas lapisan terbendalir gelembung (BFB) dan penggas lapisan terbendalir mengelilingi (CFB) [5].

#### Penggas Lapisan Terbendalir Gelembung (BFB)

Penggas ini dicirikan oleh halaju gelembung gas tersendiri yang agak rendah (<5m/s). Ia terdiri daripada satu bekas di bahagian bawah reaktor dan dilengkapi dengan jeriji di mana udara dialirkan pada bahagian tersebut. Bahan mentah biojisim yang dikisar halus diletakkan di atas jeriji. Zarah-zarah biojisim kemudiannya dipindahkan ke dalam lapisan pasir panas terbendalir dengan mengitar semula produk gas [19]. Ruiz dan rakan-rakan [20] menyatakan aliran wap yang di kawal selia melalui lapisan pada julat 1.26 kg/jam bertujuan untuk mencapai pembendaliran halaju rendah sekitar 0.18 m/s.

Penggas jenis ini disatukan dengan lapisan terbendalir yang menghasilkan pusingan aliran pepejal-gas (atau putaran) yang kuat bertujuan untuk meningkatkan pergerakan cecair reaktor bagi memastikan keadaan suhu homogen untuk tindak balas biojisim. Oleh kerana lapisan ini kebanyakannya terdiri daripada abu, suhu pada 700 hingga 1000 °C dikekalkan dengan mengawal nisbah udara/biojisim untuk mengelakkan pengumpulan [21, 22]. Abu dapat melembutkan dan membentuk fenomena nyahbendalir, hal ini dapat dicegah dengan menggunakan alumina sebagai bahan alternatif lapisan [23].

Biojisim dalam penggas ini dipirolisis untuk menghasilkan arang dengan sebatian gas bersuhu tinggi dalam lapisan. Bahan lapisan panas bertindak memecahkan sebatian arang dan gas. Proses keretakan akan bertindak mengurangkan pembentukan tar, oleh itu produk gas yang

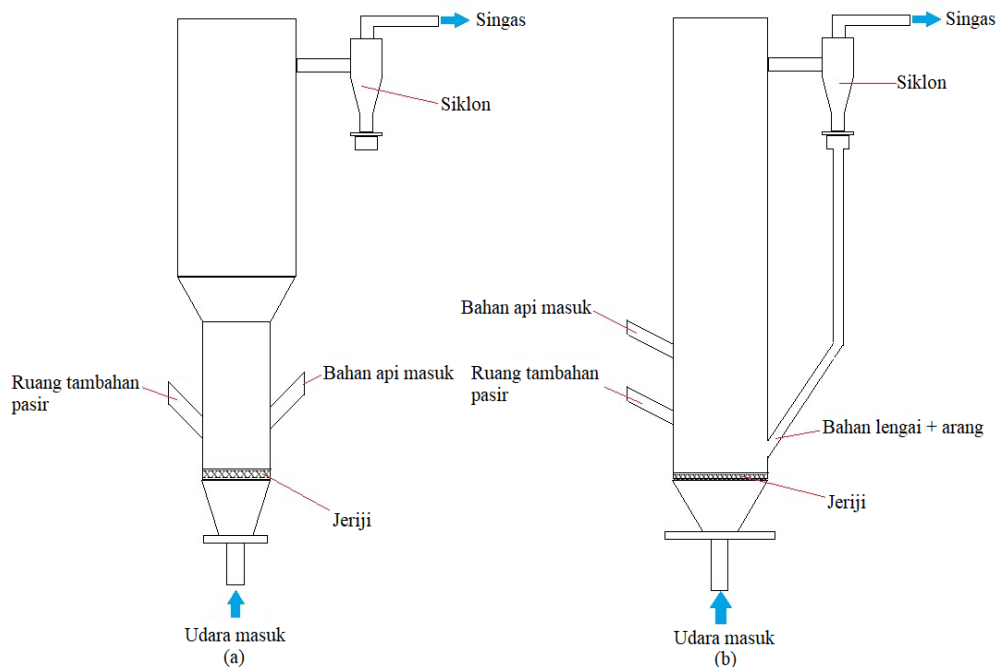
dihasilkan kebiasaannya akan mengandungi kadar tar yang rendah iaitu antara 3 hingga 40 g/Nm<sup>3</sup> [24]. Sebagai tambahan, peranti siklon pula bertindak sebagai pemisah zarah abu/arang yang diekstrak dari gas serombong. Kitaran ini diikuti oleh pepejal, kembali ke dalam lapisan terbendalir dan membentuk peredaran pepejal dalaman [25].

Arromdee dan rakan-rakan [25] pula, menggunakan udara dan wap sebagai agen penggasan untuk penggas lapisan terbendalir gelembung. Penggas yang digunakan ini telah dioperasikan dengan bahan mentah dari jenis tangkai kapas dan kulit kacang hazel. Kesan pada CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> dan nisbah kesetaraan gas nilai pemanasan rendah (LHV) serta kebolehubahan wap ke bahan api telah diperhatikan. Berdasarkan uji kaji yang dijalankan didapati kulit kacang hazel menghasilkan singas dengan LHV yang lebih tinggi daripada tangkai kapas dengan menggunakan kedua-dua agen penggasan ini, kerana nilai kalori kulit kacang hazel adalah 4493 kcal/kg lebih tinggi

daripada nilai kalori tangkai kapas iaitu 3990 kcal / kg.

Wap dilihat berkecekapan tinggi sebagai agen penggasan berbanding udara. Ini kerana LHV yang dihasilkan untuk kulit kacang hazel dan tangkai kapas masing-masing meningkat antara 44% dan 84%. Peningkatan LHV ini juga telah meningkatkan kadar kereaktifan komponen H<sub>2</sub>. Manakala bagi penggunaan air (wap) dalam tindak balas peralihan air-gas pula, didapati telah meningkatkan lagi pengeluaran H<sub>2</sub> [25].

Haba inersia yang tinggi daripada bahan lapisan menjadikan lapisan gelembung sesuai untuk membakar bahan api yang berkelembapan tinggi seperti kumbahan serta enapcemar industri, habuk papan dan gambut, di mana kelembapan yang besar perlu dikeluarkan sebelum pembakaran bermula. Rajah 4 (a) menunjukkan penggas lapisan terbendalir gelembung.



Rajah 4 (a) Penggas lapisan terbendalir gelembung (b) Penggas lapisan terbendalir mengeliling [6]

### Penggas Lapisan Terbendalir Mengeliling (CFB)

Penggas jenis ini beroperasi berdasarkan kaedah peredaran ruapan (termasuk gas hidrogen dan arang) dengan bahan lapisan yang berasal dari bahan mentah. Kitaran peredarannya adalah di antara ruang tindak balas dan pemisah siklon, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4 (b). Bahan lapisan dan arang dikembalikan ke dalam reaktor atau ruang tindak balas untuk dibakar, manakala abu yang terhasil diekstrak melalui pemisah siklon.

Bagi mencapai jisim pepejal bahan lakur sehingga 700 kg/m<sup>2</sup> pada halaju gas antara 5.5 dan 8.5 m/s, zarah gas, pasir dan produk biojisim yang

dikitar semula akan bergerak bersama-sama dengan zarah-zarah lapisan penaik melalui lubang orifis di dasar penaik [25]. Di dalam penggas CFB, biojisim dipirolisis dengan cepat untuk menghasilkan gas hidrokarbon. Tar dengan cepat diperangkap di dalam penggas dengan menggunakan lapisan, sementara kok dipenggaskan dengan wap di atas lapisan [26].

Di dalam reaktor CFB ini, pepejal yang beredar bersama gelung peredaran pepejal dicirikan sebagai pencampuran yang menyeluruh dengan masa mastautin yang tinggi [27]. Ketiadaan gelembung sepenuhnya menghalang gas melewati lapisan [24]. Kelebihan menggunakan tindak balas

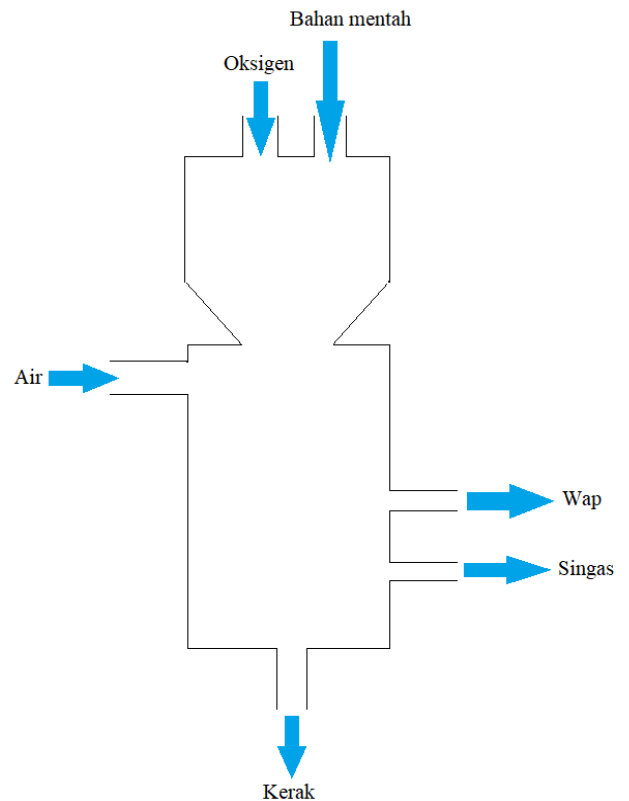
yang cepat dalam reaktor pada kadar pengangkutan haba yang tinggi adalah, pengurangan kandungan tar dalam singas berbanding dengan lapisan gelembung yang biasa digunakan [28].

Penggas lapisan terbendalir mengeliling ini dapat memproses bahan mentah dengan ukuran saiz zarah yang kecil (<400  $\mu\text{m}$ ) serta taburan saiz zarah yang lebih luas tanpa melibatkan kehilangan daya tarikan dan sesuai digunakan pada sebilangan besar bahan mentah [30, 31]. Meng dan rakan-rakan [29] menggunakan penggas CFB dengan agen penggasan terdiri daripada wap-oksigen yang dikawal pada tekanan atmosfera 100 kWth untuk mengkaji kesan pada komposisi singas terhadap dua jenis pelet habuk papan dan bahan mentah biojisim kayu *willow*. Hasilnya menunjukkan bahawa purata kepekatan  $\text{H}_2$  yang diperoleh untuk kedua bahan mentah tersebut adalah sekitar 20 hingga 30 % pada julat suhu 800 hingga 820°C. Bagi penggasan biojisim, julat komposisi  $\text{H}_2$  yang diperolehi itu adalah sangat tinggi.

### 2.1.3 Penggas Lapisan Teriring

Sebagai perbandingan dengan penggas lapisan terbendalir atau lapisan bergerak, penggas aliran teriring berfungsi pada suhu tinggi iaitu antara 1200 hingga 1500°C untuk bahan mentah yang digunakan. Komposisi produk gas yang dihasilkan didapati sangat menyamai dengan kualiti singas. Bagi mencapai kadar penukaran yang tinggi, bahan mentah pepejal mesti dihancurkan sehingga menjadi ukuran zarah yang amat kecil (<100  $\mu\text{m}$ ) bagi memudahkan sistem suapan berfungsi. Untuk sistem satu peringkat seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5, bahan mentah dan agen pengoksidaan dimasukkan serentak dengan kelajuan tinggi ke dalam reaktor pembakar untuk proses penggasan dijalankan [32]. Kelajuan aliran adalah cukup tinggi untuk menetapkan regim pengangkutan pneumatik. Dengan jangka masa mastautin antara 1 hingga 5 saat, bahan mentah teroksidasi sepenuhnya [33]. Oleh kerana tetapan suhunya yang tinggi, penggas ini menghasilkan kuantiti produk singas yang tinggi dan sesuai untuk bahan mentah yang kurang aktif. Persekitaran suhu yang tinggi, secara tidak langsung berkesan menghilangkan semua hidrokarbon, minyak, dan fenol yang terbentuk semasa tahap nyahruap, sementara jirim mineral di dalam bahan mentah tersebut pula dikeluarkan sebagai kerak [34]. Bagi mengurangkan kecekapan gas sejuk, tahap bekalan oksigen yang lebih tinggi diperlukan untuk mencapai suhu operasi yang lebih tinggi di dalam penggas. Penggas lapisan teriring kebiasaannya digunakan bagi proses sintesis bahan kimia (amonia, metanol, asid asetik), bahan api cecair dan juga untuk penghasilan kuasa elektrik [35]. Walau bagaimanapun penggas ini juga berkemampuan untuk menerima pelbagai jenis bahan mentah dari sumber biojisim seperti isirong kelapa sawit dan sisa

kayu namun kajian penggunaannya terhadap bahan-bahan tersebut adalah terhad [36].



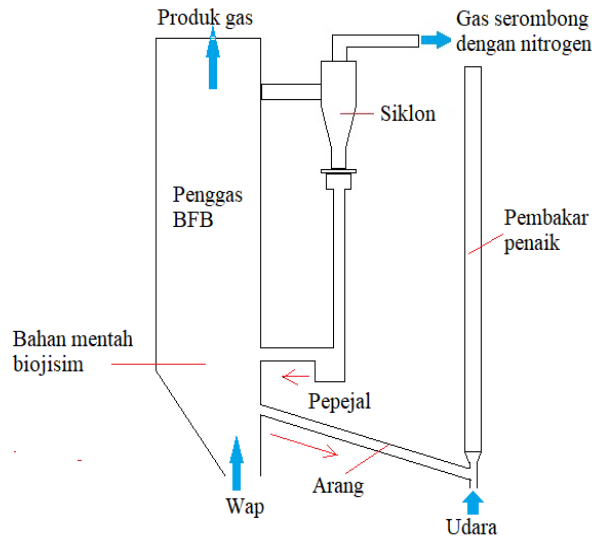
Rajah 5 Penggas lapisan teriring [6]

### 2.1.4 Penggas Lapisan Terbendalir Reaktor Berkembar

Salah satu masalah besar dalam proses penggasan udara ialah pencairan produk gas oleh nitrogen dalam udara. Permasalahan ini dapat diatasi dengan menggunakan oksigen sebagai agen penggasan. Walau bagaimanapun penggunaan oksigen sewaktu proses penggasan memerlukan penjana oksigen dan ianya terlalu mahal serta sangat besar. Kaedah lain bagi mencapai produk gas tanpa pencairan dari nitrogen ialah dengan memisahkan proses pembakaran daripada proses penggasan dalam dua reaktor.

Penggas jenis ini dibangunkan dengan dua buah kebuk iaitu penggas dan pembakar penaik. Rajah 6 menunjukkan struktur penggas jenis ini. Sistem penggas ini adalah gabungan di antara penggas lapisan terbendalir gelembung dengan pembakar lapisan terbendalir mengeliling, di mana kesan penggas adalah terhadap pirolisis, dengan secara tidak langsung dipanaskan menggunakan pasir panas daripada pembakar penaik, yang mana penukaran suhu panas dengan membakar produk arang dan udara sebelum kitaran semula kepada penggas. Wap turut ditambah bertujuan untuk meningkatkan penjanaan hidrogen melalui penukaran tindak balas dan menggalakkan tindak

balas wap-karbon. Kualiti produk adalah amat baik dari sudut perspektif nilai pemanasan, tetapi amat lemah dari sudut pembentukan tar. Konfigurasi penggasan ini kebiasaannya memberikan nilai gas pertengahan dengan nilai pemanasan rendah (LHV) antara 10 hingga 14 MJ/m<sup>3</sup>N, dan gas yang dihasilkan adalah hampir bebas nitrogen [5].



**Rajah 6** Penggass Lapisan Terbendalir Reaktor Berkembang [37]

### 3.0 AGEN PENGGASAN

Proses penggass boleh dikelaskan sebagai proses eksotermik atau endotermik. Selain itu juga, ia turut boleh dikelaskan berdasarkan agennya iaitu udara, wap, dan oksigen. Agen penggass yang berbeza didapati mempengaruhi penghasilan produk sampingan, nilai pemanasan dan komposisi gas yang berbeza. Jadual 2 merupakan ringkasan terhadap prestasi tiga agen penggass terhadap bahan mentah yang digunakan dari jenis sisa buangan pepejal bandar (MSW) [38-41].

#### 3.1 Agen Penggass Udara

Penggunaan udara sebagai agen penggass merupakan satu perkara biasa, disebabkan udara mudah diperolehi secara semula jadi dan mudah untuk digunakan. Prestasi penggass yang menggunakan agen udara bergantung kuat kepada nisbah kesetaraan (ER) dan juga suhu. Sebagai contoh, semakin tinggi suhu udara yang disuntik masuk ke dalam penggass, maka nilai pemanasan bahan api gas kering yang dihasilkan didapati semakin tinggi [42]. Namun penggass yang menggunakan agen udara menghadapi masalah yang besar disebabkan kandungan nitrogen di dalam udara adalah tinggi hingga mencecah 79% dan menyebabkan gas yang dihasilkan sangat cair serta memerlukan kos yang tinggi untuk memisahkan nitrogen daripada gas

yang terhasil [43]. Selain itu juga gas yang terhasil ini turut mengalami nilai pemanasan rendah (LHV) iaitu sekitar 3.5 hingga 7.8 MJ/m<sup>3</sup> [41]. Oleh hal yang demikian, penggunaan udara sebagai agen penggass dihadkan kepada pemanasan haba di lokasi penggunaan serta turut digunakan untuk penjana kuasa sahaja [44].

Menurut kajian yang dijalankan oleh Mohammed dan rakan-rakan [31] terhadap tandan buah kosong, mendapati apabila nisbah kesetaraan meningkat daripada 0.15 kepada 0.35, penghasilan arang dan tar masing-masing didapati semakin berkurangan daripada 13% kepada 3% dan daripada 78% kepada 62%. Ini kerana di dalam udara juga turut mengandungi kandungan oksigen, di mana menyebabkan berlakunya pengoksidaan terhadap sebatian tar dan arang sekali gus menyebabkan berlakunya pengurangan kandungan arang dan tar sambil menghasilkan CO dan CO<sub>2</sub>. Kesan nisbah kesetaraan terhadap penghasilan arang dan tar ini didapati mengukuhkan lagi kajian-kajian lain yang telah dijalankan [40, 41, 45, 46]. Apabila nisbah kesetaraan meningkat kecekapan penggass dan kecekapan penukaran karbon masing-masing lebih cenderung untuk meningkat dan kemudian mengalami penurunan. Menurut Gao dan rakan-rakan [47], peningkatan nisbah kesetaraan yang berlaku terhadap penggass habuk papan *pine* iaitu dari 0.18 hingga 0.22 telah menyebabkan berlaku peningkatan pada kecekapan penggass iaitu dari 61.43% kepada 68.15%, namun kemudiannya mengalami penurunan sebanyak 59.56% disebabkan oleh nisbah kesetaraan terus meningkat kepada 0.28 semasa proses gasifikasi. Perkara yang sama turut berlaku kepada nilai kecekapan penukaran karbon apabila menggunakan habuk papan *pine*, di mana apabila nisbah kesetaraan meningkat daripada 0.22 kepada 0.31, peratus kecekapan penukaran karbon didapati meningkat dari 81% kepada 91.5% namun kemudiannya ia didapati menurun kepada 88.5% apabila nisbah kesetaraan terus meningkat kepada 0.34 [48]. Corak keputusan yang berlaku terhadap kecekapan penggass dan kecekapan penukaran karbon dapat dijelaskan dengan perencatan pemindahan haba di antara zarah pepejal dan pemanas. Apabila lebih udara dibekalkan ke dalam reaktor, pemindahan haba yang berlaku dari pemanas ke zarah pepejal mengalami pengecutan di mana ia boleh menyebabkan berlakunya penurunan kecekapan pada penggass dan penukaran karbon.

Kandungan H<sub>2</sub> dan CO yang terdapat dalam penggass udara pada awalnya mengalami peningkatan maksimum seiring dengan peningkatan nisbah kesetaraan dan kemudiannya mengalami penurunan. Bagi kandungan CH<sub>4</sub> pula ia didapati terus menurun, manakala kandungan CO<sub>2</sub> pula didapati terus berlaku peningkatan apabila nisbah kesetaraan meningkat [49, 50, 51]. Zhao dan rakan-rakan [48] telah mengukuhkan lagi kenyataan ini dengan kajian yang dijalankan di mana apabila



nisbah kesetaraan meningkat dari 0.22 kepada 0.34, kandungan CO didapati menurun dari 25.7 kepada 21.5% isi padu, manakala kandungan CH<sub>4</sub> pula turut mengalami penurunan dari 2.45 kepada 0.87% isi padu, perkara yang sama juga turut berlaku kepada kandungan H<sub>2</sub> di mana penurunan berlaku dari 14.6 kepada 10.2% isi padu.

Bagi kepekatan CO<sub>2</sub> pula, ianya didapati meningkat secara beransur-ansur dari 11.7% menjadi 12.3%, manakala untuk nilai pemanasan rendah (LHV) ianya didapati menurun dari 6.67 MJ / m<sup>3</sup> kepada 4.65 MJ/m<sup>3</sup>, apabila nisbah kesetaraan meningkat [48].

**Jadual 2** Perbandingan perbezaan hasil produk, penggunaan gas dan komposisi gas apabila menggunakan agen penggasan yang berbeza terhadap sisa buangan pepejal bandar (MSW), diadaptasi [38-41]

Ciri-ciri	Udara	Wap	Oksigen*
Bahan mentah	MSW	MSW	MSW
Kandungan kelembapan (%)	7.59	-	8.31
Suhu (°C)	777	900	800
Nisbah kesetaraan (ER)	0.4	-	0.2
Nisbah wap kepada biojisim (S/B)	-	0.8	-
CO <sub>2</sub> (Isipadu %)	15	17.5	35.5
CO (Isipadu %)	19	16.5	30.3
CH <sub>4</sub> (Isipadu %)	5	21	10.3
H <sub>2</sub> (Isipadu %)	5	28	11.8
LHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	2.4	15.0	8.5
Kecekapan penukaran karbon (%)	61	44.1	-
Hasil gas kering (m <sup>3</sup> /kg)	1.4	0.5	-
Hasil arang (Berat %)	-	7.9	15.5
Hasil tar (Berat %)	11.4 (g/m <sup>3</sup> )	0.2	43.5
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mudah untuk digunakan dan dikendalikan.</li> <li>- Kos yang efektif untuk dilaksanakan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berkemampuan menghasilkan gas hidrogen secara selektif.</li> <li>- Gas dengan kandungan tenaga yang tinggi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nilai pemanasan sederhana.</li> <li>- Arang yang terbakar menyediakan sumber haba tambahan.</li> </ul>
Kelemahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nilai pemanasan rendah disebabkan oleh pencairan daripada nitrogen.</li> <li>- Memerlukan kos yang tinggi untuk memisahkan nitrogen dari gas-gas lain.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memerlukan sumber pemanasan dalaman untuk memperbaharui tindak balas wap.</li> <li>- Kecekapan tenaga rendah disebabkan tindak balas sifat semula jadi endotermik.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memerlukan kos modal yang tinggi bagi mendapatkan sumber oksigen tulen.</li> </ul>
Penggunaan gas	Digunakan untuk aplikasi enjin dan dandang.	Sintesis Fischer-Tropsch.	Proses pemanasan

\* Hasil yang diberikan adalah nilai purata bahan mentah MSW

### 3.2 Agen Penggasan Wap

Merujuk kepada Jadual 2, penggunaan wap sebagai agen penggasan menghasilkan sejumlah H<sub>2</sub> yang baik dengan nilai pemanasan yang tinggi berbanding dengan penggunaan udara dan oksigen sebagai agen penggasan [16]. Hal ini dikaitkan dengan peranan wap dalam mempromosikan tindak balas air-gas (primer),

peralihan gas-air dan tindak balas pembaharuan wap. Tindak balas penguraian wap dan gas-air (primer) amat penting terhadap pembentukan pengoksidaan bahan mentah. Kedua-dua tindak balas ini penting untuk menukarkan karbon organik menjadi H<sub>2</sub> dan CO. Apabila pembakaran bahan mentah berlaku, tindak balas peralihan air-gas bertindak menukarkan gas H<sub>2</sub>O dan CO menjadi H<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>.

Menurut Garcia dan rakan-rakan [52], peningkatan nisbah wap kepada biojisim, menyebabkan kandungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> di dalam gas meningkat manakala kandungan CH<sub>4</sub> dan CO pula mengalami penurunan. Kajian ini telah mengesahkan bahawa peningkatan nisbah H<sub>2</sub>/CO dan H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, serta penurunan nisbah CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> adalah disebabkan oleh peningkatan nisbah wap kepada biojisim. Ini menunjukkan bahawa agen penggasan wap mempengaruhi terhadap pembaharuan wap tar, peralihan gas-air, pembaharuan wap metana, serta pengoksidaan tindak balas karbon. Bagi arang dan tindak balas pembaharuan metana pula, ia dipertingkatkan dalam proses penggasan, yang mendorong kepada berlakunya penurunan pada CH<sub>4</sub> dan peningkatan pada H<sub>2</sub>. Selain itu juga, peningkatan nisbah wap kepada biojisim didapati telah menurunkan nisbah CO/CO<sub>2</sub> di mana ia menunjukkan bahawa tindak balas peralihan air-gas menjadi lebih dominan.

Agan penggasan wap juga bertindak, mengurangkan kandungan produk sampingan ketika proses penggasan. Menurut Rapagna dan rakan-rakan [53], apabila nisbah wap kepada biojisim meningkat dari 0.5 kepada 1.0, didapati hasil jisim tar berkurang sebanyak 49% manakala kandungan arang pula didapati menurun sebanyak 76%. Ini disebabkan oleh wap yang mendorong kepada kepelbagaian tindak balas pemeluwapan dengan arang, yang mengurangkan kandungan arang dan menjadikan selebihnya berliang [54, 55].

Bagi kajian yang dijalankan oleh Kihendu dan rakan-rakan [56], berdasarkan perbandingan ke atas agen penggasan menggunakan udara dan udara-wap, mendapati apabila penggasan dibuat terhadap kayu palet daripada pine hitam, keputusan menunjukkan agen penggasan udara menghasilkan kandungan tar sebanyak 75.3 g/m<sup>3</sup> di dalam gas, manakala agen penggasan udara-wap pula menghasilkan kandungan tar sebanyak 58.7g/m<sup>3</sup> dalam gas, sebagai tambahan agen penggasan wap mampu menurunkan kuantiti tar diantara 17% hingga 24% melebihi agen penggasan udara [57].

### 3.3 Agen Penggasan Oksigen

Agan penggasan daripada oksigen sering kali digunakan semasa proses penggasan dijalankan, ini kerana agen penggasan jenis ini berkeupayaan menghasilkan gas dengan nilai pemanasan sederhana. Menurut kajian yang dijalankan oleh Niu dan rakan-rakan [40], didapati nilai pemanasan gas yang dihasilkan boleh mencapai 8 hingga 10 MJ/m<sup>3</sup> apabila nisbah kesetaraan berada antara 0.18 dan 0.23. Walau bagaimanapun, nisbah kesetaraan yang lebih besar daripada 0.23 menyebabkan nilai pemanasan untuk gas yang dihasilkan menurun secara mendadak. Ini kerana apabila nisbah kesetaraan meningkat, tindak balas penggasan mula mengalami pengoksidaan sepenuhnya, di mana peningkatan yang pesat terhadap

kandungan CO<sub>2</sub> berlaku [40]. Kenyataan ini turut dipersetujui oleh Gao dan rakan-rakan [47], di mana berdasarkan kajian yang dijalankan mendapati penurunan kandungan H<sub>2</sub> dan CO serta peningkatan kandungan CO<sub>2</sub> adalah disebabkan oleh peningkatan nisbah kesetaraan iaitu daripada 0.05 kepada 0.30, berdasarkan perbandingan agen penggasan oksigen dengan agen penggasan udara, didapati agen penggasan oksigen mampu mencapai kadar kecekapan penukaran karbon yang lebih tinggi. Merujuk kepada kajian yang dijalankan oleh Dai dan rakan-rakan [58], menyatakan bahawa apabila nisbah kesetaraan meningkat daripada 0.9 kepada 1.3, kadar kecekapan penukaran karbon juga turut meningkat daripada 65% kepada 90%, walau bagaimanapun terdapat dua kekurangan yang perlu dihadapi apabila menggunakan agen penggasan oksigen, iaitu kos bagi oksigen asli yang terlalu tinggi dan juga kos yang besar untuk memisah oksigen daripada singas. Oleh sebab itu, oksigen selalunya digandingkan dengan wap sebagai agen penggasan [41].

## 4.0 PENGARUH FIZIKAL TERHADAP TEKNOLOGI PENGGASAN

### 4.1 Sifat Fizikal

Nilai kalori bahan pepejal yang digunakan, komposisi singas yang dihasilkan, ciri-ciri singas, nilai kalori daripada singas yang terhasil, kepekatan pelepasan gas selepas pembakaran, profil suhu semasa proses penggasan dan profil nyalaan diukur semasa proses penggasan berlaku. Parameter ini dianggap sebagai penentu kepada kualiti penghasilan singas semasa proses penggasan berlaku.

#### 4.1.1 Nilai Pemanasan Lebih Tinggi Bahan Pepejal (HHV)

Nilai kalori bahan pepejal atau nilai pemanasan lebih tinggi (HHV) merupakan parameter utama untuk menilai kualiti bahan bakar biojisim bagi penghasilan tenaga. Matlamat utama menggunakan sumber biojisim sebagai sumber tenaga adalah tertumpu kepada ketumpatan tenaga yang terkandung di dalam sumber biojisim tersebut, di mana pada kebiasaannya ia didapati menghasilkan kuantiti tenaga yang lebih rendah daripada kuantiti tenaga yang terkandung dalam bahan api fosil. Nilai kalori sumber biojisim ini biasanya dipengaruhi oleh kandungan lembapan; yang mungkin mencapai tahap kelembapan yang sangat tinggi terutamanya dalam kes biojisim hijau dan bahan buangan. Özyuguran dan Yaman [59] mendapati bahawa kandungan karbon tetap dari sumber biojisim mempunyai perkaitan dengan nilai kalori kerana ia mempunyai kesan positif terhadap potensi tenaga biojisim. Selain itu kandungan bahan yang memiliki kadar kandungan jirim meruap yang

tinggi juga didapati menghasilkan nilai kalori, namun nilai kalori yang dihasilkan adalah tidak terlalu tinggi. Ini disebabkan terdapat sebilangan kandungan dalam jirim meruap adalah dihasilkan daripada gas yang tidak mudah terbakar seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Manakala bagi kandungan abu pula, ianya tidak hanya mempunyai kesan lengai pada nilai kalori bahan api, tetapi ia didapati menyumbang kepada beberapa kesan buruk pada haba yang kelihatan, diperolehi semasa proses pembakaran biojisim. Pembentukan abu, pemecahan terma bukan organik dan peralihan fasa ini didapati memerlukan sumber tenaga yang tinggi. Ianya diperolehi daripada tenaga pembakaran biojisim, di mana secara tidak langsung dilihat memberi kesan pengurangan kepada nilai kalori. Terdapat pelbagai faktor tambahan yang mempengaruhi nilai pemanasan yang lebih tinggi (HHV) pada sumber biojisim, di mana faktor-faktor ini dilihat memberikan kesukaran dalam menentukan sifat-sifat sesuatu bahan. Kaedah yang digunakan bagi penentuan nilai kalori pepejal ini adalah mengikut piawaian yang telah ditetapkan oleh BS EN 14918:2009.

#### 4.1.2 Analisis Hampiran

Menurut Nunes, De Oliveira Matias, dan Da Silva Catalão [60], analisis hampiran bahan api merupakan kaedah untuk menentukan peratusan bahan yang terbakar dalam keadaan gas dan pepejal bersamaan dengan peratusan bahan buangan bukan organik, dalam bentuk abu. Bahan yang dibakar dalam keadaan gas dikenali sebagai jirim meruap manakala dalam keadaan pepejal pula, ia dikenali sebagai karbon tetap. Selain menganalisis bahan buangan bukan organik, jirim meruap dan kandungan karbon tetap, analisis hampiran juga melibatkan pengukuran kandungan lembapan sampel. Analisis hampiran ini dilihat mampu memberikan pemahaman mengenai tingkah laku pembakaran dan membantu dalam pembangunan reka bentuk loji kuasa [61].

Seperti yang telah dinyatakan pada perenggan sebelum ini, terdapat 4 parameter yang ditentukan melalui analisis hampiran: karbon tetap, jirim meruap, kandungan kelembapan dan abu. Jirim meruap dan kandungan karbon tetap, merupakan satu bentuk simpanan tenaga kimia [62].

Menurut Cavalaglio dan rakan-rakan [63], peningkatan jirim meruap juga didapati akan mempengaruhi suhu puncak, di mana titik pada kadar kehilangan berat berada pada tahap yang paling maksimum. Menurut Muthu Dinesh Kumar dan Anand [64] menyatakan bahawa bahan api dengan jirim meruap yang tinggi tidak diperlukan kerana kecenderungan kepada penghasilan tar yang lebih tinggi, serta dapat memberikan kesan negatif kepada alatan pembakaran. Komposisi tar terdiri daripada sebatian aromatik seperti fenol, benzena, naftalena dan lain-lain yang meruap serta terkondensasi ketika berada pada keadaan proses penggasan. Namun pembentukan tar boleh juga

berlaku pada keadaan suhu yang rendah serta rantaian organik yang pendek seperti asid, keton, aldehid dan lain-lain. Berdasarkan kajian yang dijalankan sisa pertanian yang terdiri daripada 73 hingga 83% berat dan sisa buangan pepejal bandar dengan 77 hingga 86% berat, cenderung untuk menghasilkan jumlah kandungan tar yang tinggi disebabkan kandungan jirim meruap yang tinggi [41].

Analisis hampiran juga turut melibatkan kajian ke atas kandungan abu, di mana ia penting kerana dapat memungkinkan ramalan awal yang terbentuk dalam komposisi dandang dan arang semasa proses pirolisis dan penggasan berlaku [63]. Bahan mentah yang mengandungi kadar kandungan abu yang tinggi boleh menimbulkan kesan buruk kepada penyambungan reaktor, pensinteran pemangkin serta masalah kepada pembuangan sisa. Menurut kajian yang dijalankan oleh Gregorio dan rakan-rakan [65], mendapati apabila peningkatan abu berlaku di dalam baja tahi ayam dengan kadar nilai 17.2% kepada 25.1%, kadar kecekapan penggasan didapati menurun dari 63% kepada 33%, manakala kandungan  $\text{H}_2$  dan  $\text{CO}$  juga turut didapati menurun dengan ketara, tidak terkecuali juga nilai pemanasan lebih tinggi (HHV) dari gas yang terhasil juga turut menurun daripada 4.3  $\text{MJ/m}^3$  kepada 2.6  $\text{MJ/m}^3$ .

Basu [66] pula menyatakan bahawa piawaian E-870-06 boleh digunakan untuk melakukan analisis hampiran terhadap bahan api pepejal seperti kayu. Walau bagaimanapun, piawaian ini telah digantikan dengan ASTM E-870-82. Di samping itu, Basu [66] juga menyatakan bahawa piawaian yang berbeza perlu diterapkan bagi menganalisis komponen yang berbeza, untuk analisis jirim meruap, ASTM E-872 digunakan, sementara untuk pembentukan kandungan abu pula ialah ASTM-D-1102. Manakala bagi kandungan kelembapan sampel berkayu pula menggunakan piawaian ASTM E-871, namun untuk karbon tetap ia dapat ditentukan melalui kaedah yang berbeza.

#### 4.1.3 Analisis Mukatamad

Analisis muktamad merupakan kaedah yang digunakan untuk menentukan kandungan karbon, nitrogen dan hidrogen di dalam sampel bahan api melalui proses pembakaran [67]. Kaedah ini bertujuan sebagai pengesahan terhadap kandungan komposisi unsur bahan api dalam bentuk pepejal [68]. Maklumat komposisi unsur ini amat penting untuk penghasilan singas dan ia dapat membantu penyelidik untuk meramalkan dan menganalisis prestasi pembakaran, kerana sifat dan komposisi bahan mempunyai pengaruh besar terhadap pengeluaran tenaga dan pembentukan emisi pembakaran. Unsur-unsur yang ditentukan dari bahan api biojisim adalah seperti karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur dan oksigen, ia dinyatakan berdasar peratusan berat bagi setiap unsur. Pada masa kini analisis muktamad dilakukan dengan menggunakan

peralatan berteknologi tinggi. Peralatan yang digunakan dalam analisis muktamad dikenali sebagai penganalisis elemen pelbagai tiub mikro, yang digabungkan mengikut piawaian ASTM D5373.

Unsur kimia yang terdapat dalam setiap sampel biojisim yang digunakan terdiri daripada karbon (C), oksigen (O), hidrogen (H), nitrogen (N) dan sulfur (S), ianya ditentukan melalui analisis kimia dan hasilnya dinyatakan dalam peratusan jisim, bebas kelembapan. Bagi mengukur unsur C dan H, ia ditentukan dengan membakar setiap sampel pada berat yang ditetapkan (kira-kira 0.2g) di dalam wap oksigen, dalam alat pembakaran yang juga digunakan untuk analisis sebatian organik. Arang C dan H masing-masing diubah menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

Produk gas, hasil dari pembakaran kemudian masing-masing diserap masuk ke dalam tiub KOH dan CaCl<sub>2</sub> dengan kadar berat yang ditetapkan serta pada kadar peningkatan yang ditentukan. Pengukuran unsur N ditentukan dengan mencerna 1g sampel arang dalam termos leher panjang dengan menggunakan larutan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat bersama K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Setelah larutan menjadi lebih jelas, ia kemudian dirawat dengan menggunakan KOH dan membebaskan ammonia yang disuling dan diserap ke dalam larutan asid dengan kuantiti isi padu yang telah ditetapkan. Bahagian asid yang tidak digunakan kemudian ditentukan dengan kaedah titrasi menggunakan NaOH, yang mana jumlah ammonia yang dibebaskan dapat ditentukan. Oleh itu, peratusan N dalam setiap sampel dapat dihitung. Manakala jumlah unsur S pula ditentukan dari pencucian yang diperoleh dari jisim arang yang digunakan dalam kalorimeter bom. Semasa proses ini S diubah menjadi sulfat. Pencucian tersebut kemudian dirawat dengan larutan barium klorida di mana barium sulfat dimendapkan. Endapan ini disaring, dicuci dan dipanaskan hingga berat seragam. Peratusan S dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.

$$\text{Peratus S} = \frac{32 * m_{\text{BaSO}_4}}{233 * m_{\text{PKS}}} 100 \quad (2)$$

Bahan mentah yang mengandungi kuantiti nitrogen dan sulfur yang tinggi akan menyebabkan penghasilan emisi NO<sub>x</sub> atau SO<sub>x</sub> serta keracunan pemangkin. Kebanyakan nitrogen ketika proses penggasan, terbentuk dalam keadaan organik kompleks dan bertindak balas dengan hidrogen ketika dalam keadaan penggasan bagi membentuk ammonia dan hidrogen sianida. Nitrogen juga turut dibebaskan dalam jumlah yang sedikit sebagai nitrogen molekul, oksida nitrogen dan pelbagai sebatian organik beraroma manakala sebilangan kecil lagi nitrogen disimpan dalam pepejal bahan mentah yang tidak bertindak balas [69,70]. Bagi sulfur pula ianya sering dipancarkan dalam bentuk H<sub>2</sub>S ketika dalam keadaan penggasan, ini menyebabkan berlakunya kesukaran dalam rawatan dan pemisahan gas. Berdasarkan kajian kebanyakan bahan mentah sisa bio mengandungi

kurang daripada 1.5% berat sulfur, manakala bagi bahan pencemar kumbahan dan produk buangan haiwan pula masing-masing mengandungi jumlah sulfur sebanyak ~ 1% berat dan 0.5% berat [70].

#### 4.1.4 Ciri-ciri dan Komposisi Gas

Kebolehubahan yang wujud dalam komposisi dan nilai pemanasan singas, menjadikan ia sebagai satu cabaran yang penting terhadap penggunaannya dalam sistem pembakaran praktikal. Komposisi gas dilihat dipengaruhi oleh beberapa elemen yang terdapat dalam komposisi bahan pepejal seperti jenis tanaman yang digunakan sebagai bahan api, kandungan air, proses tindak balas suhu dan proses penggasan dari pembakaran dalam reaktor penggas.

Singas yang dihasilkan terdiri daripada lima jenis gas khas seperti H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>. Menurut Norafzanizam dan rakan-rakan [71], H<sub>2</sub> dan CO biasanya menyumbang 50% tenaga dalam produk singas, sementara tenaga yang tersisa pula terkandung dalam CH<sub>4</sub> dan hidrokarbon (aromatik). Nilai pemanasan rendah (LHV) singas pula bergantung pada komposisi gas. Kandungan yang lebih tinggi terhadap gas yang tidak terbakar mampu menyumbang kepada penurunan bacaan LHV. Faktor seperti bahan pepejal, kaedah penggasan dan susuk suhu juga turut dilihat mempengaruhi LHV. Oleh itu, persiapan yang rapi serta bersesuaian diperlukan semasa uji kaji dijalankan, bertujuan untuk memastikan ketepatan data dan kaitannya dengan analisis keseluruhan.

## 5.0 KELEBIHAN PENGGUNAAN TEKNOLOGI PENGGASAN

Penggasan menurut perspektif alam sekitar menawarkan beberapa kelebihan berbanding kaedah pembakaran biasa terhadap bahan api dari jenis pepejal, minyak pekat, industri pengkarbonan dan sisa buangan domestik. Antara kelebihan dan manfaat daripada penggunaan teknologi penggasan ini adalah, pertama sekali dari segi pembentukan emisi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>) dan sulfur (SO<sub>2</sub>), yang boleh menyebabkan berlakunya hujan asid, penggasan dilihat menghasilkan produk singas bersih di mana pengurangan penghasilan zarah-zarah cemar berlaku semasa proses dijalankan. Sulfur yang terdapat dalam bahan mentah semasa proses penggasan ditukarkan kepada H<sub>2</sub>S, manakala nitrogen oksida pula ditukarkan kepada dwi atom iaitu nitrogen (N<sub>2</sub>) dan NH<sub>3</sub>. Kedua-dua H<sub>2</sub>S dan NH<sub>3</sub> dikeluarkan melalui proses hiliran bagi penghasilan singas bersih. Oleh itu, sekiranya produk singas bersih dibakar dalam turbin gas bagi penjanaan elektrik atau di dalam dandang untuk menghasilkan wap atau air panas, maka pembentukan sulfur dan nitrogen oksida adalah terlalu kecil atau tidak wujud disebabkan kedua-duanya telah pun berkurangan

dengan ketara. Manakala sekiranya singas bersih ini digunakan untuk menghasilkan produk pertengahan seperti pembuatan bahan kimia, kesan sampingan seperti hujan asid tidak akan berlaku. Selain itu, zarah-zarah di dalam singas mentah juga dilihat turut mengalami pengurangan disebabkan oleh sistem pembersihan gas berperingkat bagi memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan oleh pembuat turbin gas. Zarah-zarah ini dikeluarkan melalui siklon, penyental, penapis kering dan kemudiannya dimasukkan ke dalam penyejukan gas dan sistem penyingkiran asid gas [72].

Kelebihan kedua apabila menggunakan teknologi penggasan ini adalah pembentukan furan dan sebatian dioksin tidak berlaku. Furan merupakan sebatian organik heterosiklik, yang terdiri daripada lima atom cincin aromatik iaitu empat atom karbon dan satu atom oksigen. Sebatian kimia lain yang mengandungi cincin tersebut juga turut disebut sebagai furan. Furan adalah cecair yang tidak berwarna, mudah terbakar, sangat mudah meruap dan takat didih hampir sama dengan suhu bilik. Manakala sebatian dioksin pula dikenali sebagai pencemar organik berterusan (POP), yang bermaksud apabila sebatian ini berada di persekitaran ia mengambil masa yang lama untuk berlaku penyusutan. Sebatian dioksin merupakan sebatian yang sangat toksik dan boleh menyebabkan barah, masalah pembiakan dan perkembangan, kerosakan sistem imun, dan boleh mengganggu hormon. Pembakaran jirim organik merupakan sumber utama kepada peningkatan tahap toksik ini dan penyebab berlakunya pencemaran karsinogenik.

Terdapat dua penyebab utama sebatian dioksin dan furan tidak terbentuk semasa proses penggasan. Pertama, kekurangan oksigen pada persekitaran penggas mencegah kepada pembentukan klorin bebas daripada HCL dan menghadkan pengklorinan bagi sebarang sebatian awal dalam penggas. Kedua pula adalah suhu proses penggasan yang tinggi telah memusnahkan furan dan dioksin awal dalam bahan mentah dengan lebih berkesan. Sebagai tambahan sekiranya singas di bakar dalam turbin gas dengan kehadiran oksigen, suhu pembakaran yang tinggi didapati tidak membantu kepada pembentukan klorin bebas. Selain itu, pembentukan pasca pembakaran dioksin atau furan tidak dijangka untuk berulang kerana terlalu sedikit zarah yang diperlukan untuk pembentukan pasca pembakaran terhadap kehadiran sebatian ini dalam gas serombong.

Dioksin dan furan adalah merujuk kepada molekul atau perubahan sebatian oksigen dan karbon. Sebatian ini apabila bertindak balas dengan halogen seperti klorin atau bromin menghasilkan sifat-sifat beracun atau toksik. Kebanyakan penyelidikan terhadap dioksin yang dihalogenkan dan furan turut memberi perhatian terhadap spesies berklorin. Secara umumnya dioksin dan furan telah diterima sebagai produk sampingan proses pembakaran termasuk domestik dan pembakaran

sisia perubahan atau proses penunuan [72]. Dalam proses pembakaran, hidrokarbon awal bertindak balas dengan sebatian berklorin atau molekul bagi membentuk furan atau dioksin. Ia turut terbentuk dalam pasca pembakaran sistem penyejukan gas serombong disebabkan kehadiran sebatian awal, klorin bebas atau karbon tak terbakar dan spesies tembaga dalam zarah abu yang berterbangan [73].

Penyediaan data yang terhad dari proses penggasan adalah mengenai kepekatan sebatian organik yang mudah meruap, sebatian organik separa meruap (SVOCs) dan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs). Berdasarkan data yang sedia ada menunjukkan bahawa VOCs, SVOCs, dan PAHs sama ada tidak dapat dikesan dalam aliran gas serombong dari proses IGCC atau dalam beberapa kes lain ianya dapat dikesan, tahapnya sangat rendah (mengikut urutan bahagian perbillion dan lebih rendah). Analisis singas juga menunjukkan lebih daripada 99.99 peratus klorobenzena dan heksaklorobenzena mengalami kemusnahan dan berlaku kecekapan penyingkiran manakala tahap PAHs serta VOCs terpilih adalah, sebahagian perbillion atau kurang kepekatan [72, 74-78].

## 6.0 PERBANDINGAN TEKNOLOGI PENGGASAN DAN PEMBAKARAN

Secara umumnya proses penggasan tidak boleh diklasifikasikan sebagai proses pembakaran. Sebaliknya, ia merupakan proses penukaran yang menghasilkan produk-produk yang lebih bernilai dan berguna terjana daripada bahan mentah berkarbon. Proses penggasan dan pembakaran merupakan proses menukarkan bahan mentah berkarbon kepada gas, namun proses penggasan dioperasikan dalam keadaan ketiadaan oksigen atau dengan kehadiran oksigen yang terhad manakala proses pembakaran pula dioperasikan dengan kehadiran oksigen sepenuhnya. Objektif utama proses pembakaran adalah memusnahkan bahan mentah secara terma bagi tujuan penjanaan haba, berbeza pula dengan proses penggasan, di mana tujuan penggasan adalah untuk menukarkan bahan mentah kepada produk yang lebih mesra alam, bernilai tinggi, sebagai produk pertengahan yang boleh digunakan untuk menghasilkan pelbagai jenis bahan kimia, bahan api dan penghasilan tenaga [79].

Bahan-bahan mentah yang digunakan sewaktu proses penggasan secara umumnya mempunyai elemen-elemen seperti C, H, O, N, S dan Cl, ianya kemudian ditukarkan menjadi produk singas yang terdiri daripada HCN, HCL, COS, N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>S, unsur asas karbon dan kesan gas hidrokarbon yang lebih jelas. Manakala, bagi produk yang dihasilkan daripada proses pembakaran pula terdiri daripada HCL, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NO, CO dan NO<sub>2</sub> [72].

Semasa proses pembakaran dan penggasaan berlaku, produk sampingan yang terhasil daripada kedua-dua proses tersebut adalah berbeza. Bagi proses penggasaan, semasa keadaan suhu yang rendah produk sampingan yang terhasil adalah arang. Arang terdiri daripada karbon yang tidak bertindak balas dan kehadiran bahan mineral dalam reaktor penggasaan. Penggunaan arang yang paling ketara dan penting adalah sebagai sumber karbon yang diaktifkan. Fungsi utama karbon yang diaktifkan adalah untuk rawatan air dan air kotor serta bertindak sebagai penyahwarna. Penggunaan lain bagi karbon yang diaktifkan ialah untuk memerangkap pencemaran seperti sebatian organik meruap (VOCs) dan sisa racun perosak dari industri. Semasa proses penggasaan menghasilkan suhu yang tinggi, produk sampingan yang terhasil adalah kerak yang berkaca. Lanya terdiri daripada bahan bukan organik yang tidak meruap di dalam reaktor penggasaan. Apabila penggasaan berada pada keadaan suhu tinggi iaitu di atas suhu pelakuran dan peleburan, bahan mineral akan melebur dan dikeluarkan sebagai kerak lebur, yang terbentuk seperti bahan berkaca semasa disejukkan. Kerak ini tidak merbahaya dan selalunya digunakan sebagai bahan campuran untuk membuat jalan atau sebagai bahan kasar untuk pemecahan pasir [72].

Bagi produk sampingan utama yang dihasilkan dari proses pembakaran pula, ialah abu bawah di mana ia dikategorikan sebagai sisa tidak terbakar dari proses pembakaran, serta terdiri daripada bahan mineral dan sedikit jumlah karbon tidak aktif. Abu bawah ini dipertimbangkan sebagai merbahaya kecuali abu bawah yang dihasilkan dari pembakaran sumber biojisim [72].

## 7.0 PERKEMBANGAN PEMBANGUNAN TEKNOLOGI PENGGASAN

Perkembangan teknologi penggasaan pernah melalui fasa-fasa pertumbuhan dan kemerosotan, akibat didorong oleh permintaan sumber tenaga serta pasaran kimia dan pengaruh geopolitik dunia. Sejak mula diperkenalkan pada tahun 1792 oleh Murdoch seorang jurutera berbangsa Scottish yang menjalankan proses pirolisis terhadap arang batu bagi membekalkan cahaya di kediaman beliau, teknologi ini semakin berkembang sebagai salah satu kaedah membekalkan tenaga untuk lampu-lampu jalan di sekitar Westminster Bridge pada tahun 1816 dan di jalan-jalan sekitar Boston dan New York pada tahun 1826 [80]. Perkembangan penggasaan arang batu semakin berkembang pesat pada pertengahan abad ini [81]. Menjelang tahun 1875, penghasilan gas ini berkembang pesat dan digunakan secara meluas sebagai projek pencahayaan di kediaman, manakala pada penghujung abad ke-19, penghasilan gas ini diaplikasikan secara meluas untuk kegunaan domestik dan industri. Pada awal tahun 1900 proses

penggasaan biojisim mula digunakan secara meluas bagi menghasilkan gas sintesis untuk kegunaan sebagai bahan api, bahan kimia dan hidrogen. Ketika perang dunia kedua, lebih daripada satu juta penggasaan jenis penghembus udara dibina bagi menghasilkan gas sintesis dari sumber kayu dan arang batu bertujuan sebagai bahan api kenderaan serta untuk penjana wap dan elektrik [82].

Teknologi penggasaan semakin mendapat perhatian terutamanya ketika tahun 1960an dan 1970an, apabila berlaku kontroversi berkaitan penyusutan simpanan bahan api dunia menjelang tahun 1980an dan 1990an yang mendorong kepada kesedaran untuk mendapatkan bahan api baru daripada sumber alternatif. Menjelang tahun 1980an para penyelidik dan industri telah menemui kelebihan daripada penggunaan teknologi penggasaan terhadap alam sekitar, di mana ketika itu piawaian yang cukup ketat ditetapkan bagi menjaga kualiti alam sekitar terutama dari segi pelepasan emisi, sisa buangan domestik dan industri serta penekanan terhadap kesan rumah hijau. Impak daripada kelebihan yang terdapat pada teknologi penggasaan ini telah mendorong kerajaan dan pemegang saham industri untuk terus menerokai teknologi ini, serta mempromosikannya untuk di komersilkan [72].

Berdasarkan laporan tinjauan pada tahun 2003, terdapat lebih 163 projek penggasaan di seluruh dunia dikomersilkan termasuk jumlah keseluruhan 468 jenis penggasaan [83]. Lebih daripada 120 buah loji janakuasa memulakan operasi sekitar tahun 1960 hingga 2000 dengan majoriti 72 buah janakuasa dioperasikan selepas tahun 1980. Kebanyakan loji janakuasa yang wujud direka bentuk dan dibina untuk menghasilkan gas sintesis yang terdiri daripada hidrogen dan karbon monoksida, di mana penghasilan hidrogen atau dikenali sebagai Fischer-Tropsche (F-T) singas mentah bertujuan untuk menghasilkan bahan api kenderaan, minyak pelincir dan lilin khas. Selain itu hidrogen yang dihasilkan turut digunakan untuk menghasilkan pelbagai jenis bahan kimia dan baja. Manakala kini, loji janakuasa yang direka untuk menghasilkan gas sintesis, amat sesuai digunakan sebagai bahan api bagi turbin gas untuk penghasilan tenaga elektrik bersih, sebagai contoh projek penjana tenaga bersih melibatkan Global Energy's Wabash River Power Station di Indiana dan Tampa Electric's Polk Country Power Station yang terletak di Florida, kedua-dua stesen janakuasa ini beroperasi sejak tahun 1995 dan 1996 masing-masing dengan menggunakan arang batu sebagai bahan mentah. Selain itu stesen janakuasa yang menggunakan sumber biojisim pula adalah seperti projek Rudersdorfer Zement di Jerman, projek Corenso United Oy Ltd dan Oy W. Schauman ab Mills di Finland serta banyak lagi.

Penggunaan teknologi penggasaan dilihat amat sesuai untuk diaplikasikan di masa akan datang terutama penggasaan biojisim, kerana ia dilihat sebagai salah satu kaedah untuk menampung permintaan penggunaan tenaga yang tinggi selain

mengurangkan kadar kebergantungan kepada bahan api fosil. Pertambahan populasi penduduk dunia menjadi faktor utama kepada peningkatan permintaan penggunaan tenaga, sebagai contoh negara China, telah menyaksikan kenaikan tinggi penggunaan tenaga per kapita sejak beberapa dekad yang lalu, dan berkemungkinan akan berlaku peningkatan seterusnya. Dengan jumlah penduduk sekitar 1.35 bilion. Penggunaan tenaga per kapita di China dari tahun 2012 didapati meningkat hingga ke tahap 5000 kWj serta memerlukan tambahan keupayaan penjanaan sekitar 250 GW kuasa lagi, bagi menampung keperluan penduduk. Begitu juga di India, dengan jumlah penduduk sekitar 1.25 bilion, lebih daripada 600 GW kapasiti kuasa tambahan diperlukan. Kapasiti tenaga elektrik dan bahan api tambahan akan terus meningkat dari masa ke semasa bagi memenuhi permintaan tenaga yang semakin tinggi. Bagi menampung keperluan tenaga di masa hadapan, fokus utama teknologi pengelasan perlu diperluaskan, pengelasan bukan sahaja bertujuan untuk menghasilkan bahan kimia, sebaliknya lebih kepada usaha menghasilkan bahan api bersih sebagai sumber tenaga. Peralihan kepada sumber biojisim sebagai bahan api alternatif untuk pengelasan juga dilihat mampu menampung kepada permintaan sumber tenaga di masa hadapan [84].

## 8.0 PENGGUNAAN BAHAN MENTAH BIOJISIM

Bahan mentah biojisim terdiri daripada pelbagai jenis sumber dan ianya juga merujuk kepada bahan organik yang berasal daripada tumbuh-tumbuhan dan haiwan [85]. Kepelbagaian sumber ini boleh dikelaskan dengan pelbagai cara bergantung kepada struktur dan jenisnya. Basu [37] telah membahagikan sumber biojisim ini kepada dua bahagian. Bahagian pertama dikenali sebagai biojisim dara iaitu biojisim ligno-selulosa yang terdiri daripada kayu, tumbuh-tumbuhan dan daun; manakala biojisim berasaskan karbohidrat pula ialah seperti sayur-sayuran dan tanaman. Bagi bahagian kedua pula ialah sisa yang terdiri daripada pepejal dan cecair seperti sisa pepejal bandaran, kumbahan, sisa haiwan dan manusia, gas-gas yang berasal dari tapak pelupusan sampah serta sisa-sisa pertanian.

Biojisim lignoselulosa merupakan sumber utama biojisim, ianya boleh dibahagikan kepada dua jenis. Jenis yang pertama terdiri daripada kumpulan tumbuhan herba yang mempunyai daun dan batang, serta mati apabila di penghujung musim. Contoh tanaman yang di tanam mengikut musim adalah seperti padi, gandum, oat dan rumput. Manakala jenis kedua pula ialah bukan tumbuhan herba, dan hidup sepanjang masa tanpa mengikut musim, contoh tumbuhan ini adalah seperti pokok kayu, pokok menjalar dan pokok renek. Bagi biojisim

daripada sumber pokok kayu, ia terdiri daripada pengekstrak, komponen dinding sel dan abu. Kebiasaannya, pengekstrak dibuang daripada pengekstrakan biojisim dengan menggunakan pelarut neutral yang terdiri daripada sebatian seperti lemak, resin, gula, minyak, pati, tanin, gam dan alkaloid. Manakala bagi komponen dinding sel pula, ia turut dibahagikan kepada selulosa, lignin dan hemiselulosa. Komponen dinding sel merupakan polisakarida, selulosa, ialah jalinan molekul-molekul glukosa dalam rangkaian panjang berbentuk kerangka struktur dinding-dinding sel tumbuhan, berbeza pula dengan jenis hemiselulosa, juga seperti rangkaian dan terdiri daripada beberapa jenis monosakarida, dan lignin polimer aromatik kompleks. Manakala bagi abu, merupakan bahan tidak organik daripada bahagian tumbuhan yang terdiri daripada Si, K, Ca, S dan Cl. Sebagai contoh untuk kayu komponen dinding sel dan abu adalah seperti berikut (dalam peraturan biojisim kering): selulosa 40 hingga 45%, hampir sama dengan kayu lembut dan kayu keras, manakala lignin adalah 25% hingga 35% dalam kayu lembut dan 17 hingga 25% dalam kayu keras, bagi hemiselulosa pula di dalam kayu lembut mengandungi 20% dan di dalam kayu keras pula mengandungi 15 hingga 35%, bagi jumlah pengekstrak pula terdapat berbagai nilai yang berbeza-beza iaitu bermula daripada 1 sehingga lebih daripada 10% dan kandungan abu ialah 1 hingga 3% [5].

## 9.0 KESIMPULAN

Teknologi pengelasan boleh dianggap sebagai teknologi bersih kerana ia berjaya mencapai pengurangan dalam pembentukan emisi CO<sub>2</sub>, bertindak sebagai penukaran bahan mentah kepada produk yang lebih mesra alam, bernilai tinggi, sebagai produk pertengahan yang boleh digunakan untuk menghasilkan pelbagai jenis bahan kimia, bahan api dan penghasilan tenaga, peralatannya yang kecil serta padat, mampu mencapai tahap kecekapan tenaga terma yang tinggi dan tahap kawalan yang baik serta sesuai digunakan untuk pelbagai jenis bahan mentah termasuk biojisim. Sistem pengelasan menawarkan kelebihan teknologi yang lebih ekonomi berbanding dengan teknologi penjanaan tenaga yang lain. Sumber bahan mentah terutama dari sumber biojisim yang digunakan dalam teknologi pengelasan ini merupakan salah satu strategi untuk membantu mengurangkan masalah pencemaran alam sekitar, dengan kadar pembentukan NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> yang terlalu rendah, ianya membantu mengekang masalah hujan asid. Selain itu penggunaan bahan mentah yang berasaskan tanaman untuk pengoperasian teknologi pengelasan ini juga, telah membuka ruang bagi penjanaan ekonomi baru kepada para petani untuk menjual hasil sisa

tanaman bagi ditukarkan menjadi sumber tenaga kepada negara.

Apabila teknologi penggasan di bandingkan dengan teknologi pembakaran, penghasilan gas dari bahan api oleh sistem penggas adalah lebih rendah dari segi isipadu dan suhu serta mampu untuk menghasilkan pembakaran yang lengkap menggunakan pembakar. Ciri-ciri ini memberikan bahan api bersih sebelum digunakan. Pembakaran singas yang dihasilkan akan menjadi lebih terkawal berbanding biojisim pepejal dan kesannya, pembentukan gas emisi daripada penggunaan sistem penggas dapat dikurangkan.

## Penghargaan

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Pusat Pengurusan Penyelidikan, Universiti Teknologi Malaysia dan Sekolah Kejuruteraan Mekanikal, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Teknologi Malaysia atas pemindahan pengetahuan dan menyediakan kemudahan dan ruang penyelidikan untuk menjalankan kajian penyelidikan ini di bawah Geran Tier 2 (16J35), UTMER (18J14) dan PRGS ICC (4J443).

## Rujukan

- [1] Souza-Santos, M. L. D. 2004. *Solid Fuels Combustion and Gasification: Modelling, Simulation, and Equipment Operation*. Vol. 462. New York: CRC Press.
- [2] Sikarwar, V. S., et al. 2017. Progress in Biofuel Production from Gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*. 61: 189-248.
- [3] Monteiro, E., et al. 2013. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*. 36: 596-606.
- [4] Kawaguchi K., Miyakoshi K., Momonoi K. 2002. Studies on the Pyrolysis Behavior of Gasification and Melting Systems for Municipal Solid Waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 4(2):102-110.
- [5] Engvall, K., Liljedahl, T., & Dahlquist, E. 2013. Biomass and Black Liquor Gasification. Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation. CRC Press. 175-216.
- [6] Olofsson, I., Nordin, A., & Söderlind, U. 2005. Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels. Umeå Universitet.
- [7] Neubauer, Y. 2013. Biomass Combustion Science, Technology and Engineering: 6. Biomass Gasification. Elsevier Inc. Chapters.
- [8] Bridgwater, A. V. 1995. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation. *Fuel*. 74(5): 631-653.
- [9] Ahrenfeldt, J. 2012. *Handbook Biomass Gasification*. H. Knoef (Ed.). Enschede: BTG Biomass Technology Group.
- [10] Yilmaz, S., Selim, H. 2013. A Review on the Methods for Biomass to Energy Conversion Systems Design. *Renew Sustain Energy Rev*. 25: 420-30.
- [11] Lee, J-W., Yun, Y., Chung, S-W., Kang, S-H., Ryu, J-H., Kim, G-T., Kim, Y-J. 2014. Application of Multiple Swirl Burners in Pilot-scale Entrained Bed Gasifier for Short Residence Time. *Fuel*. 117: 1052-60.
- [12] Mandl, C., Obernberger, I., Scharler, I. R. 2011. Characterisation of Fuel Bound Nitrogen in the Gasification Process and the Staged Combustion of Producer Gas from the Updraft Gasification of Softwood Pellets. *Biomass Bioenergy*. 35(11): 4595-604.
- [13] Asadullah, M. 2014. Barriers of Commercial Power Generation using Biomass Gasification Gas: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29: 201215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074> [Accessed: 5 May 2020].
- [14] Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., Bouziane, K. 2013. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*. 36: 596-606.
- [15] Martínez, J. D., Mahkamov, K., Andrade, R. V., Silva Lora, E. E. 2012. Syngas Production in Downdraft Biomass Gasifiers and its Application using Internal Combustion Engines. *Renew Energy*. 38(1): 1-9.
- [16] Prasad, L., Subbarao, P. M. V., Subrahmanyam, J. P. 2014. Pyrolysis and Gasification Characteristics of Pongamia Residue (de-oiled cake) using Thermogravimetry and Downdraft Gasifier. *Appl Therm Eng*. 63(1): 379-86.
- [17] Boateng, A. A., Mtui, P. L. 2012. CFD Modeling of Space-Time Evolution of Fast Pyrolysis Products in a Bench-scale Fluidized-bed Reactor. *Appl Therm Eng*. 33-34:190-8.
- [18] Olgun, H., Ozdogan, S., Yinesor, G. 2011. Results with a Bench Scale Downdraft Biomass Gasifier for Agricultural and Forestry Residues. *Biomass Bioenergy*. 35(1): 572-80.
- [19] Bell, D. A., Towler, B. F., Fan, M. 2011. Gasifiers. Coal Gasification and Its Application. Elsevier Inc. 73-100.
- [20] Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., Mendivil, M. A. 2013. Biomass Gasification for Electricity Generation: Review of Current Technology Barriers. *Renewabl Sustainable Energy Rev*. 18: 174-83.
- [21] Yaghoubi, E., Xiong, Q., Doranehgard, M. H., Yeganeh, M. M., Shahriari, G., Bidabadi, M. 2018. The Effect of Different Operational Parameters on Hydrogen Rich Syngas Production from Biomass Gasification in a Dual Fluidized Bed Gasifier. *Chem Eng Process - Process Intensification*. 126: 210-21.
- [22] Nam, H., Rodriguez-Alejandro, D .A., Adhikari, S., Brodbeck, C., Taylor, S., Johnson, J. 2018. Experimental Investigation of Hardwood Air Gasification in a Pilot Scale Bubbling Fluidized Bed Reactor and CFD Simulation of Jet/grid and Pressure Conditions. *Energy Convers Manage*. 168: 599-610.
- [23] Siedlecki, M., de Jong, W. 2011. Biomass Gasification as the First Hot Step in Clean Syngas Production Process. Gas Quality Optimization and Primary Tar Reduction Measures in a 100 kW Thermal Input Steam. Oxygen Blown CFB Gasifier. *Biomass Bioenergy*. 35: S40-62.
- [24] Udomsirichakorn, J., Basu, P., Salam, P. A., Acharya, B. 2013. Effect of CaO on Tar Reforming to Hydrogen-enriched Gas with In-process CO<sub>2</sub> Capture in a Bubbling Fluidized Bed Biomass Steam Gasifier. *Int J Hydrog Energy*. 38(34): 14495-504.
- [25] Arromdee, P., Kuprianov, VI. 2012. A Comparative Study on Combustion of Sunflower Shells in Bubbling and Swirling Fluidized-bed Combustors with a Coneshaped Bed. *Chem Eng Process* 62: 26-38.
- [26] Matsuoka, K., Hosokai, S., Kuramoto, K., Suzuki, Y. 2013. Enhancement of Coal Char Gasification using a Pyrolyzer-gasifier Isolated Circulating Fluidized Bed Gasification System. *Fuel Process Technol*. 109: 43-8.
- [27] Bahng, M. K., Mukarakate, C., Robichaud, D. J., Nimlos, M. R. 2009. Current Technologies for Analysis of Biomass Thermochemical Processing: A Review. *Anal Chim Acta*. 651(2): 117-38.
- [28] Yi, C-K., Son, J-E. 2010. Comparison of Two Different Hot-gas Desulfurization Powder Processes: Transport Reactor and Bubbling Fluidized Bed. *Adv Powder Technol*. 21(2): 119-24.
- [29] Meng, X., de Jong, W., Fu, N., Verkooijen, A. H. M. 2011. Biomass Gasification in a 100 kWth Steam Oxygen Blown Circulating Fluidized Bed Gasifier: Effects of Operational



- Conditions on Product Gas Distribution and Tar Formation. *Biomass Bioenergy*. 35(7): 2910-24.
- [30] Kraussler, M., Binder, M., Schindler, P., Hofbauer, H. 2018. Hydrogen Production within a Polygeneration Concept based on Dual Fluidized Bed Biomass Steam Gasification. *Biomass Bioenergy*. 111: 320-9.
- [31] Xiong, Q., Yeganeh, M. M., Yaghoubi, E., Asadi, A., Doranehgard, M. H., Huang, K. 2018. Parametric Investigation on Biomass Gasification in a Fluidized Bed Gasifier and Conceptual Design of Gasifier. *Chem Eng Process - Process Intensification*. 127: 271-91.
- [32] Kong, X., Zhong, W., Du, W., Qian, F. 2014. Compartment Modeling of Coal Gasification in an Entrained Flow Gasifier: A Study on the Influence of Operating Conditions. *Energy Convers Manage*. 82: 202-11.
- [33] Tremel, A., Becherer, D., Fendt, S., Gaderer, M., Spliethoff, H. 2013. Performance of Entrained Flow and Fluidised Bed Biomass Gasifiers on Different Scales. *Energy Convers Manage*. 69: 95-106.,
- [34] Gazzani, M., Manzolini, G., Macchi, E., Ghoniem, A. F. 2013. Reduced Order Modeling of the Shell-Preflco Entrained Flow Gasifier. *Fuel*. 104: 822-37.
- [35] Plis, P., Wilk, R. K. 2011. Theoretical and Experimental Investigation of Biomass Gasification Process in a Fixed Bed Gasifier. *Energy*. 36(6): 3838-45.
- [36] Ding, L., Yoshikawa, K., Fukuhara, M., Kowata, Y., Nakamura, S., Xin, D., Muhan, L. 2018. Development of an Ultra-small Biomass Gasification and Power Generation System: Part 2. Gasification Characteristics of Carbonized Pellets/briquettes in a Pilot-scale Updraft Fixed Bed Gasifier. *Fuel*. 220: 210-219.
- [37] Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- [38] He, M., Hu, Z., Xiao, B., Li, J., Guo, X., Luo, S., ... & Liu, S. 2009. Hydrogen-rich Gas from Catalytic Steam Gasification of Municipal Solid Waste (MSW): Influence of Catalyst and Temperature on Yield and Product Composition. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34(1): 195-203.
- [39] Thamavithya, M., & Dutta, A. 2008. An Investigation of MSW Gasification in a Spout-fluid Bed Reactor. *Fuel Processing Technology*. 89(10): 949-957.
- [40] Niu, M., Huang, Y., Jin, B., & Wang, X. 2014. Oxygen Gasification of Municipal Solid Waste in a Fixed-bed Gasifier. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 22(9): 1021-1026.
- [41] Watson, J., Zhang, Y., Si, B., Chen, W. T., & de Souza, R. 2018. Gasification of Biowaste: A Critical Review and Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 83: 1-17.
- [42] Lucas, C., Szewczyk, D., Blasiak, W., Mochida, S. 2004. High-temperature Air and Steam Gasification of Densified Biofuels. *Biomass Bioenergy*. 27: 563-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.015>.
- [43] Navarro, R. M., Peca, M., Fierro, J. L. G., Pen, M. 2007. Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks. *Foss Fuels Biomass*. 107: 3952-91. <http://dx.doi.org/10.1021/cr0501994>.
- [44] Hamelinck, C. N. 2002. Paper 2 Future Prospects for Production of Methanol and Hydrogen from Biomass. *Journal of Power Sources*. 111(1): 1-22.
- [45] Xiao R, Jin B, Zhou H, Zhong Z, Zhang M. 2007. Air Gasification of Polypropylene Plastic Waste in Fluidized Bed Gasifier. *Energy Convers Manag*. 48: 778-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.004>.
- [46] Hamad, M. A., Radwan, A. M., Heggo, D. A., Moustafa, T. 2016. Hydrogen Rich Gas Production from Catalytic Gasification of Biomass. *Renew Energy*. 85: 1290-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.082>.
- [47] Gao, N., Li, A., Quan, C., Qu, Y., Mao, L. 2012. Characteristics of Hydrogen-rich Gas Production of Biomass Gasification with Porous Ceramic Reforming. *Int J Hydrog Energy*. 2012;37:9610–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.069>.
- [48] Zhao Y, Sun S, Zhou H, Sun R, Tian H, Luan J, et al. Experimental study on sawdust air gasification in an entrained-flow reactor. *Fuel Process Technol* 2010;91:910–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.01.012>.
- [49] Xiao R, Jin B, Zhou H, Zhong Z, Zhang M. Air gasification of polypropylene plastic waste in fluidized bed gasifier. *Energy Convers Manag* 2007;48:778–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.004>.
- [50] Mansaray KG, Ghaly AE, Al-Taweel AM, Hamdullahpur F, Ugursal VI. Air gasification of rice husk in a dual distributor type fluidized bed gasifier. *Biomass Bioenergy* 1999;17:315–32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00046-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00046-X).
- [51] Manyà JJ, Sánchez JL, Ábrego J, Gonzalo A, Arauzo J. Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification of dried sewage sludge in a bubbling fluidised bed. *Fuel* 2006;85:2027–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.04.008>.
- [52] García L, Salvador ML, Arauzo J, Bilbao R. Catalytic steam gasification of pine sawdust. Effect of catalyst weight/biomass flow rate and steam/biomass ratios on gas production and composition. *Energy Fuels* 1999;13:851–9. <http://dx.doi.org/10.1021/ef980250p>.
- [53] Rapagnà S, Jand N, Kiennemann A, Foscolo PU. Steam-gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles. *Biomass Bioenergy* 2000;19:187–97. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00031-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00031-3).
- [54] Li X, Li CZ. Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part VIII. Catalysis and changes in char structure during gasification in steam. *Fuel* 2006;85:1518–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.01.007>.
- [55] Gadsby J, Ninshelwood CN, Sykes KW. The kinetics of the reactions of the steam-carbon system. *Proc R Soc Lond Philos Trans Ser A: Math Phys Eng Sci* 1946. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1983.0054>.
- [56] Kihedu JH, Yoshiie R, Naruse I. 2016. Performance Indicators for Air and Air-steam Autothermal Updraft Gasification of Biomass in Packed Bed Reactor. *Fuel Process Technol*. 141: 93-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.07.015>.
- [57] Roche, E., De Andrés, J. M., Narros, A., Rodríguez, M. E. 2014. Air and Air-steam Gasification of Sewage Sludge. the Influence of Dolomite and throughput in Tar Production and Composition. *Fuel*. 115: 54-61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.003>.
- [58] Dai, B. Q., Wu, X. J., Lou, T., Zhang, Z. X. 2013. Experimental Study on Rich Oxygen Gasification and Ash Character in Entrainedflow Coal Gasifier. *Adv Mater Res*. 860-863: 1405-11. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1405>.
- [59] Özyüğüran, Ayşe, and Serdar Yaman. 2017. Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. *Energy Procedia*. 107: 130-136.
- [60] Nunes, L. J. R., De Oliveira Matias, J. C., & Da Silva Catalão, J. P. (2018). Chapter 1 - Introduction. In L. J. R. Nunes, J. C. De Oliveira Matias, & J. P. Da Silva Catalão (Eds.), *Torrefaction of Biomass for Energy Applications* (pp. 1-43); Academic Press.
- [61] García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. 2013. Biomass Proximate Analysis using Thermogravimetry. *Bioresource Technology*. 139: 1-4.
- [62] McKendry, P. 2002. Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*. 83(1): 37-46.
- [63] Cavalaglio, G., Cotana, F., Nicolini, A., Coccia, V., Petrozzi, A., Formica, A., & Bertini, A. J. S. 2020. Characterization of Various Biomass Feedstock Suitable for Small-Scale Energy Plants as Preliminary Activity of Biocheaper Project. *Sustainability*. 12(16): 6678.
- [64] Muthu Dinesh Kumar, R., & Anand, R. 2019. Chapter 5 - Production of Biofuel from Biomass Downdraft Gasification

- and Its Applications. In A. K. Azad & M. Rasul (Eds.). Advanced Biofuels. Woodhead Publishing. 129-151.
- [65] Di Gregorio, F., Santoro, D., Arena, U. 2014. The Effect of Ash Composition on Gasification of Poultry Wastes in a Fluidized Bed Reactor. *Waste Manag Res.* 32: 323-30. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X1452581>.
- [66] Basu, P. 2010a. Chapter 2 - Biomass Characteristics. In P. Basu (Ed.). Biomass Gasification and Pyrolysis. Boston: Academic Press. 27-63.
- [67] Gao, N., Šliž, M., Quan, C., Bieniek, A., & Magdziarz, A. 2021. Biomass CO<sub>2</sub> Gasification with CaO Looping for Syngas Production in a Fixed-bed Reactor. *Renewable Energy.* 167: 652-661
- [68] Liu, H. 2011. 5 - Biomass Fuels for Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: Resources, Conversion And Applications. In R. Beith (Ed.). Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems Woodhead Publishing. 88-122.
- [69] Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, 1st ed. Academic Press; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00009-X>.
- [70] Higan, C., Burgt, M. 2003. Gasification. 2nd ed. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-075067707-3/50002-4>.
- [71] Samiran, N. A., Ng, J. H., Jaafar, M. N. M., Valera-Medina, A., and Chong, C. T. 2016 H<sub>2</sub>-rich Syngas Strategy to Reduce NO<sub>x</sub> and CO Emissions and Improve Stability Limits under Premixed Swirl Combustion Mode. *International Journal of Hydrogen Energy.* 41(42): 19243-19255.
- [72] Rezaian, J., & Cheremisinoff, N. P. 2005. *Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists*. CRC Press.
- [73] Raghunathan, K., & Gullett, B. K. 1996. Role of Sulfur in Reducing PCDD and PCDF Formation. *Environmental Science & Technology.* 30(6): 1827-1834.
- [74] Williams, A., Wetherold, B., & Maxwell, D. 1996. Summary Report: Trace Substance Emissions from a Coal-fired Gasification Plant (No. DOE/PC/93253-T3). Radian Corp., Austin, TX (United States).
- [75] Baker, D. C. 1994. Projected Emissions of Hazardous Air Pollutants from a Shell Coal Gasification Process-Combined-cycle Power Plant. *Fuel.* 73(7): 1082-1086.
- [76] Vick, S. 1996, October. Slagging Gasification Injection Technology for Industrial Waste Elimination. *Gasification Technologies Conference, San Francisco, CA.*
- [77] Salinas, L., Bork, P., & Timm, E. 1999, October. Gasification of Chlorinated Feeds. *Gasification Technologies Council's Conference, San Francisco, California.*
- [78] Richards, M. K., & Rosenthal, S. 1994. US EPA's Evaluation of a Texaco Gasification Technology. *Superfund XV Conference Proceedings*. Volume 1.
- [79] Panepinto, D., Tedesco, V., Brizio, E., & Genon, G. 2015. Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste and Biomass Valorization.* 6(1): 123-135.
- [80] Mayers, M. A. 1945. Chemistry of Coal Utilization. Editor. HH Lowry. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1: 917.
- [81] Probst, R. F., & Hicks, R. E. 2006. *Synthetic Fuels*. Courier Corporation.
- [82] Klass, D. L. 1998. *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*. Elsevier.
- [83] U.S. Department of Energy, <http://www.netl.doe.gov/coalpower/gasification/model>.
- [84] Strategic Analysis, <https://synthesisenergy.gcs-web.com/static-files/fe8684ea-1eb4-464d-8a45-4beaaf60715f>.
- [85] Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. 2018. An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies. *Energies.* 11(11): 3115.