

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengolahan sampah**

Sampah adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat dan sampah spesifik adalah sampah yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau volumenya memerlukan pengelolaan khusus. Sampah erat kaitannya dengan kesehatan masyarakat karena dari limbah-limbah tersebut akan hidup berbagai mikroorganisme penyebab penyakit (bakteri patogen) dan juga binatang serangga sebagai pemindah / penyebar penyakit (vektor).

Selain sampah kota yang tampaknya hanya berupa sampah padat dari perkotaan (*municipal solid waste*), sampah kota juga sebenarnya terdiri dari jenis sampah komersial (areal usaha kantor, pasar, pejalagan, industri dan produk industri), sampah medis, serta sampah berupa lumpur (tinja, pengolahan air kotor kota, endapan sungai dan instalasi pengolahan limbah pabrik) (Setneg. Indonesia, 2018).

Pemusnahan dan/atau pengolahan limbah padat ini dapat dilakukan melalui berbagai cara, antara lain sebagai berikut :

1. Ditanam (*landfill*) yaitu pemusnahan limbah dengan membuat lubang ditanah kemudian sampah dimasukkan dan ditimbun dengan tanah.
2. Dijadikan pupuk (*composting*) yaitu pengolahan limbah menjadi pupuk (kompos), khususnya untuk limbah organik daun-daunan, sisa makanan, dan limbah lain yang dapat membusuk.
3. Dilakukan pemilahan. Novita (2010) menyatakan bahwa pemilahan jenis sampahnya dapat dilakukan dengan penggolongan yang mudah terbakar atau tidak, organik atau inorganik, kimia B3 (bahan berbahaya dan beracun) atau tidak serta penyeragaman ukuran. Ma (2010) menyatakan bilamana sampah perkotaan (MSW) telah dilakukan proses pemilahan, dapat dikategorikan sebagai jenis sampah RDF (*refused derived fuel*), sehingga dapat diharapkan jenis sampah RDF ini akan memiliki nilai pembakaran

yang lebih tinggi, sehingga setiap jenis golongan sampah dapat ditentukan jenis teknologi *waste to energy* nya.

Pada dasarnya ada dua alternatif proses pengolahan limbah menjadi energi, yaitu proses biologis dan proses termal.

#### 1. Proses Konversi Biologis

Proses konversi biologis dapat dicapai dengan cara *digestion* secara anaerobik (biogas) atau tanah urug (*landfill*). Biogas adalah teknologi konversi biomassa (sampah) menjadi gas dengan bantuan mikroba *anaerob*. Sudibyo (2017) menyatakan bahwa pengolahan sampah dengan cara biologis membutuhkan biaya yang lebih rendah untuk pengolahan secara termal, tetapi lebih sulit untuk mengendalikan pertumbuhan bakteri dan membutuhkan lebih banyak waktu. Gnanapragasam and Rosen (2017) menyatakan bahwa proses konversi biologis menghasilkan gas yang kaya akan metana dan *slurry*. Gas CH<sub>4</sub> memiliki potensi merusak 20 kali lebih besar daripada gas CO<sub>2</sub> dan tergolong reaktif dalam udara bebas dengan waktu peluruhan sekitar 10 tahun. Gas metana dapat digunakan untuk berbagai sistem pembangkitan energi sedangkan *slurry* dapat digunakan sebagai kompos.

#### 2. Proses Konversi Thermal

a. Insinerasi, pada dasarnya, pembakaran adalah reaksi kimia oksigen (Oksidasi) dengan bahan yang mudah terbakar. Limbah umumnya bahan yang sangat heterogen, yang pada dasarnya terdiri dari organik, mineral, logam dan air. Selama pembakaran, selain melepaskan panas, dihasilkan gas buang, dengan komponen yang terbesar ialah CO<sub>2</sub>. Aktivitas pengelolaan sampah memberikan kontribusi positif pada gas rumah kaca (GRK). Dedi (2017) menyatakan bahwa gas Karbondioksida memiliki sifat untuk memantulkan kembali gelombang pendek dari bumi, sehingga menyebabkan suhu di permukaan bumi menjadi naik. Autret *et al.* (2007) menyatakan bahwa proses pembakaran berlangsung dalam

sepersekian detik menghasilkan gas buang dan secara bersamaan juga melepaskan energi. Leonard and Herumurti (2013) menyatakan bahwa Insinerasi mampu mengurangi massa limbah hingga 70% dan mengurangi volume hingga 90%. Arvanitoyannis *et al.* (2008) menyatakan bahwa unsur-unsur penyusun sampah lainnya seperti belerang (S) dan nitrogen (N) akan dioksidasi menjadi oksida-oksida dalam fasa gas ( $SO_x$ ,  $NO_x$ ) yang terbawa di gas buang.

- b. Pirolisis merupakan proses konversi bahan organik padat melalui pemanasan tanpa kehadiran oksigen / oksigen minim. Suhu yang relatif rendah digunakan untuk pirolisis, dalam kisaran 400-800 ° C. Arvanitoyannis *et al.* (2008) menyatakan bahwa hasil pirolisis dapat berupa *tar*, larutan asam asetat, *methanol* dan gas buang.
- c. Gasifikasi adalah proses yang menggunakan panas, tekanan, dan uap untuk mengubah bahan secara langsung menjadi gas yang utamanya terdiri dari karbon monoksida dan hidrogen. Rogoff, M. J., & Screve (2011) menyatakan bahwa dibutuhkan sumber energi untuk menghasilkan kalor yang sangat tinggi, supaya dapat memproses sampah tersebut.

Ada 2 jenis gasifikasi dalam hal untuk pengelolaan sampah, yaitu :

#### A. Gasifikasi Konvensional

Sudibyo (2017) menyatakan bahwa gasifikasi konvensional adalah konversi limbah padat menjadi *syngas* melalui reaksi pembentukan gas. Konten organik sampah dikonversi menjadi karbon monoksida, hidrogen, dan metana dengan jumlah yang lebih rendah.

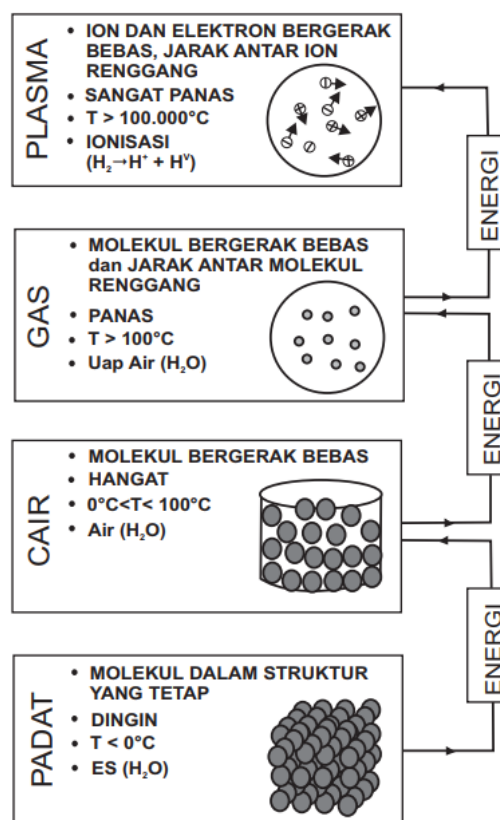
#### B. Gasifikasi Plasma

Fabry (2013) menyatakan bahwa Gasifikasi Plasma merupakan proses *allothermal* (dengan cara *plasma torch* sebagai elemen eksternal) di mana sampah organik secara termal didekomposisi menjadi elemen penyusunnya. Plasma bertindak sebagai agen reformasi dengan menggunakan GA berfase gas untuk memecahkan rantai hidrokarbon

kompleks menjadi sederhana pada *syngas*. Chumak *et al.* (2015) menyatakan bahwa teknologi plasma juga bisa diterapkan pada sampah padat, dengan melelehkan fraksi anorganik dan mengubahnya menjadi agregat. Kekurangan dari gasifikasi konvensional, hanya menghasilkan *syngas* dengan kualitas yang rendah, akibat dari jumlah massa yang rendah dan LHV yang rendah. Lorcet (2009) menyatakan bahwa untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar / bahan baku kimia, dibutuhkan nilai pengotor pada *syngas* yang sangat rendah, di bawah 0.1 mg/Nm<sup>3</sup>.

## 2.2 Fisika Plasma

Plasma merupakan penamaan untuk gas yang terionisasi. Pertama kali dikemukakan oleh Langmuir pada tahun 1928. Nur (2011) menyatakan bahwa penamaan plasma terhadap gas terionisasi ini terilhami dari plasma darah, karena beberapa sifat gas terionisasi tersebut yang sangat berbeda dengan gas, sehingga plasma disebut sebagai materi fase ke empat, seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Ilustrasi fase plasma (Nur, 2011)

Plasma adalah materi di alam yang bisa mendukung agar reaksi fusi bisa berhasil. Nur (2011) menyatakan bahwa plasma merupakan kumpulan gas berdensitas tinggi ( $10^7$ - $1.032 \text{ m}^2$ ) yang terionisasi dan berada di dalam lautan elektron. Plasma dibangkitkan dengan memberikan energi yang cukup besar sehingga elektronnya terlepas dengan tetap menjaga muatan totalnya netral, biasanya dengan cara memberikan energi termal. Temperatur plasma sendiri diukur dengan satuan eV dan bisa mencapai  $10^5$  eV atau setara dengan  $10^{10}$  K. Ini adalah temperatur elektron, sementara temperatur ion biasanya jauh lebih rendah. Plasma bisa dikategorikan ke dalam dua jenis, menurut temperturnya, yakni plasma dingin (*cold plasma*) dan plasma panas (*hot plasma*).

a) Plasma Dingin / Plasma non termal

Plasma dingin sering digunakan dalam bidang mikroelektronik, pembentukan materi baru dan pembersihan polutan. Nur (2011) menyatakan bahwa plasma jenis ini dihasilkan dalam berbagai jenis lecutan corona, medan listrik pada elektroda titik bidang, lecutan penghalang dielektrik, lecutan mikro. Saat ini, teknologi plasma dingin atau Non-Termal Plasma banyak digunakan oleh industri-industri untuk proses pelapisan (*coating* dan *etching*), digunakan untuk mengatasi gas buangan  $\text{NO}_x$  dan  $\text{SO}_x$ , dan digunakan untuk pengawetan makanan (*plasma for food*) dan pengakselerasian penyembuhan luka medis (*plasma for medical*) yang telah dikembangkan oleh *Teaching Industry* Universitas Diponegoro.

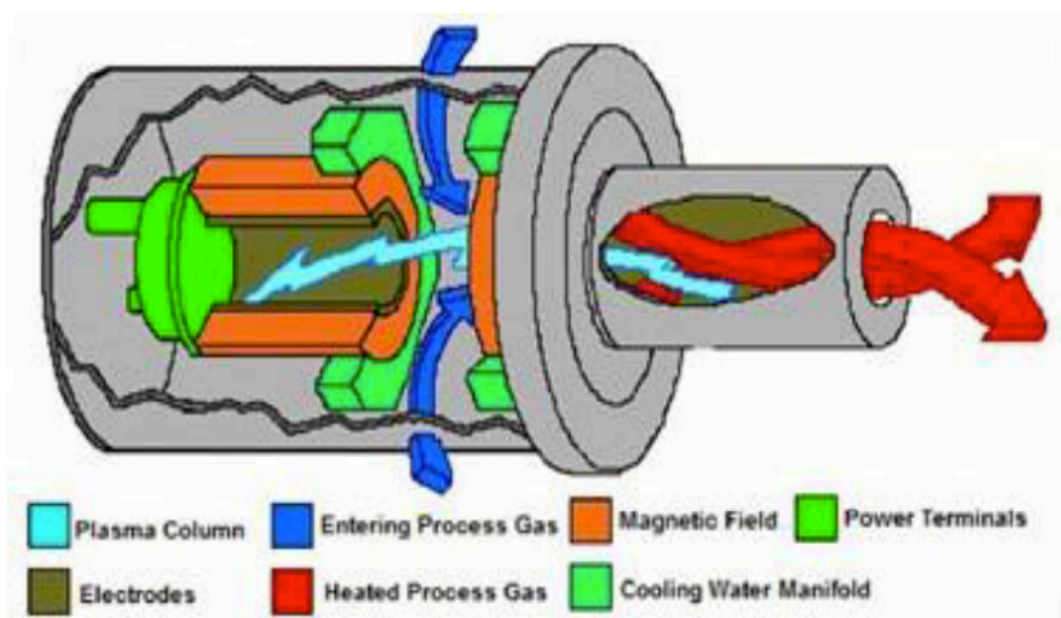
b) Plasma Panas / Plasma termal

Musale and Padhya (2013) menyatakan bahwa Plasma Termal digunakan di dalam teknologi untuk merecover energi dan produk yang masih berguna dari sampah. Plasma termal dapat mencapai suhu hingga  $10000 \text{ }^\circ\text{C}$  dekat sumber arc-nya. Fabry (2013) menyatakan bahwa Plasma termal merupakan sarana yang efektif untuk pengolahan semua jenis limbah.

### 2.3 Gasifikasi Plasma

Gasifikasi plasma merupakan teknologi yang mengaplikasikan plasma termal. Dasar pembentukan plasma adalah sederhana. Pertama, sebuah arus bertegangan tinggi dilewatkan antara dua elektroda yang menghasilkan “busur plasma” intensitas tinggi seperti terlihat pada Gambar 2.2.. Hal ini menyebabkan elektron dari udara sekitar tertarik dan mengubah gas menjadi plasma. Pada gasifikasi plasma, tegangan yang melewati elektroda tersebut tergolong tinggi dengan arus yang besar, yang disebut sebagai *Plasma torch*, yang merupakan komponen utama dari sistem gasifikasi plasma

Gas yang dilewatkan pada *plasma torch* tersebut bisa berupa oksigen, nitrogen atau lainnya. Muvhiwa *et al.* (2018) menyatakan *plasma torch* adalah sumber panas yang independen dan langsung. Hal ini memungkinkan pengontrolan suhu reaktor, terlepas dari fluktuasi kualitas *feedstock* dengan penggunaan GA yang mungkin berbeda. Anyaegbunam (2014) menyatakan bahwa *plasma torch* digunakan untuk menghasilkan suhu plasma yang terkendali dalam kisaran dari 1500 °C hingga 10.000 °C.

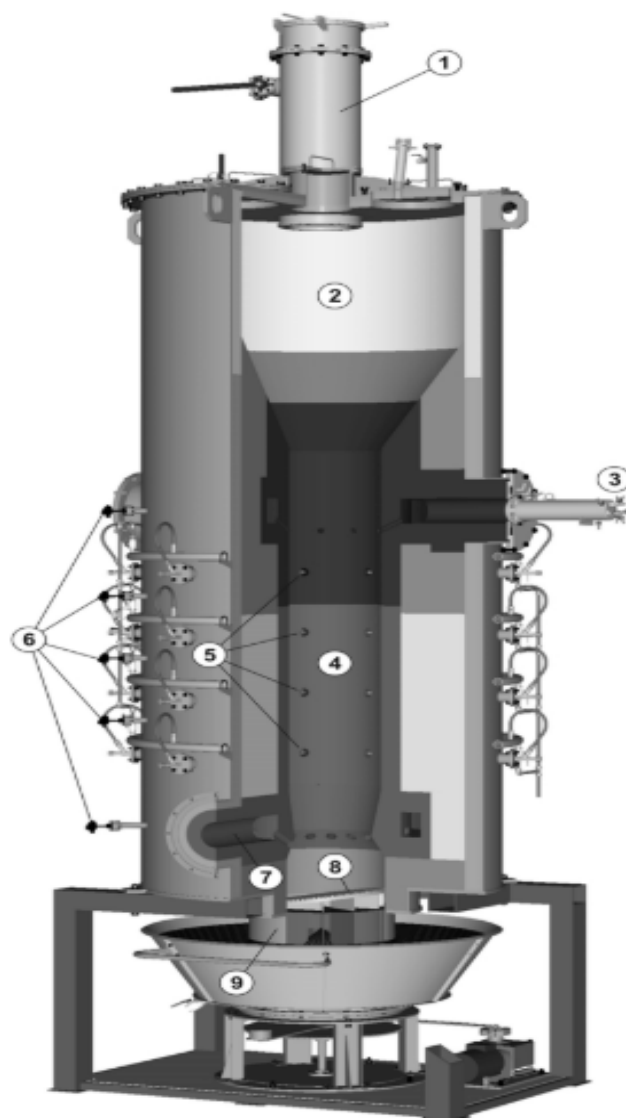


Gambar 2. 2 Plasma torch (Anyaegbunam, 2014)

*Fixed Bed Reaktor* merupakan jenis reaktor yang biasa digunakan pada proses gasifikasi plasma, seperti terlihat pada Gambar 2.4 dan terbagi menjadi 2 jenis :

a. *Updraft fixed bed reactor*

Sampah dimasukkan dari atas, namun GA nya dimasukkan dari bagian tengah bawah dari reaktor dan *Syngas* hasil produksinya dialirkan melalui bagian atas reaktor, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Molino *et al.* (2018) menyatakan bahwa urutan reaksi yang terjadi yaitu sampah akan mengalami *drying* (pengeringan) pada *drying zone*, lanjut dengan *pyrolysis* (pembakaran dengan oksigen minim) pada *pyrolysis zone*, lanjut dengan *reduction* pada *reduction zone* dan tiba di *thermal zone* bereaksi.



Keterangan Gambar ;

1. Katup input feedstock
2. Hopper feedstock treatment
3. Torch Plasma
4. Silinder reaktor
5. Blast Holes
6. Thermocouples
7. Jalur keluar syngas
8. Fire Grate
9. Hidrolik putar silinder reaktor

Gambar 2. 3 Reaktor Gasifikasi Plasma (A.N. Bratsev, 2007)

Kekurangan dari *updraft fixed bed reactor* ialah :

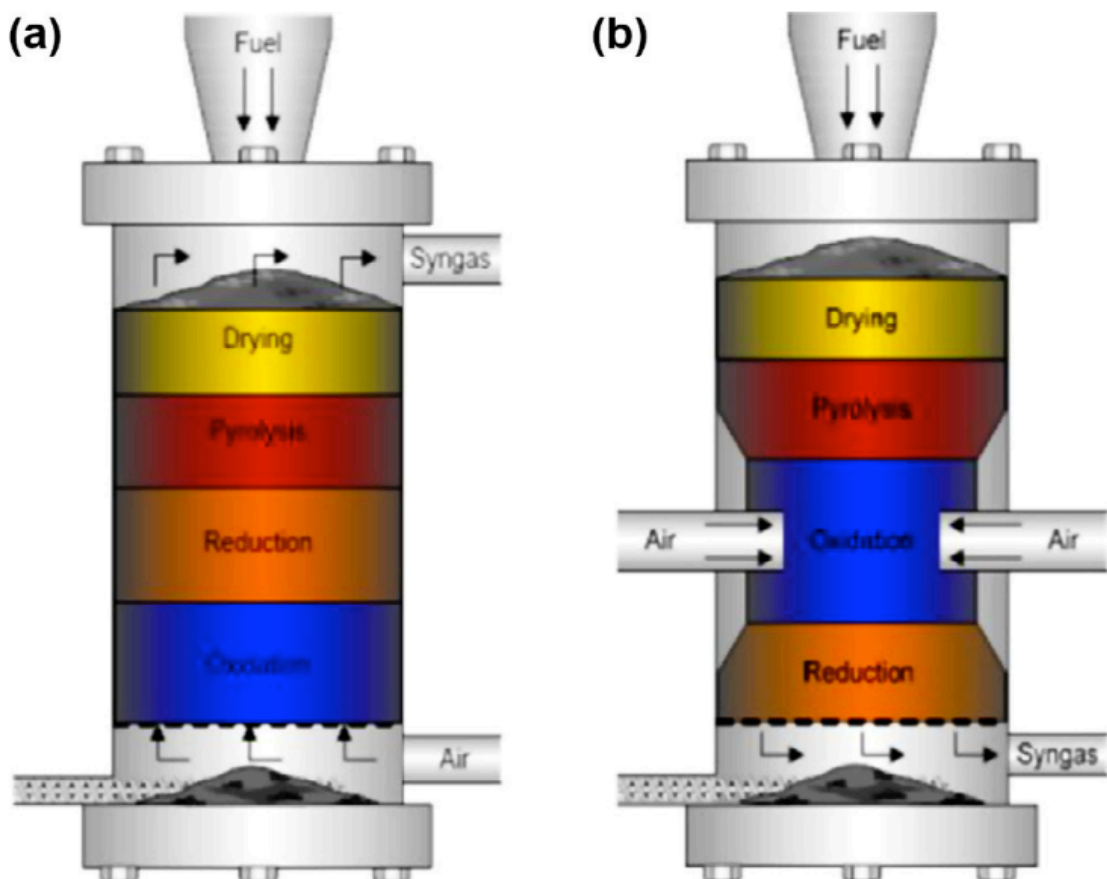
- Tingginya kandungan tar pada *syngas*
- Hasil *syngas* CO & H<sub>2</sub> lebih sedikit
- Properties dari *feedstock* yang lebih homogen

Kelebihan dari *updraft fixed bed reactor* ialah :

- Efisiensi termal yang lebih tinggi
- Dapat menangani material dengan berbagai jenis ukuran
- Dapat menangani *feedstock* dengan kelembaban yang tinggi

b. *Downdraft fixed bed reactor*

Sampah dimasukkan dari bagian atas, namun GA nya dimasukkan dari bagian tengah dari reaktor dan *Syngas* hasil produksinya dialirkan melalui bagian bawah reaktor.



Gambar 2. 4 Fixed Bed (a) *Updraft*, (b) *Downdraft*, Molino, et.al, (2016)



Molino *et al.* (2018) menyatakan bahwa urutan reaksi yang terjadi yaitu sampah dan *GA* akan bertemu di *drying zone*, lalu akan menuju *pyrolysis zone*, lalu menuju zone termal plasma dan terakhir menuju zone *reduction*. *Syngas* hasil produksinya dialirkan melalui bagian bawah reaktor.

Kekurangan dari *downdraft fixed bed reactor* ialah :

- a) Ukuran material *feedstock* harus lebih kecil (< 100mm)
- b) Material *feedstock* harus dengan kelembaban yang lebih rendah
- c) Kesulitan dalam pengontrolan temperatur

Kelebihan dari *downdraft fixed bed reactor* ialah :

- a) Konversi karbon yang lebih tinggi
- b) Kandungan *tar* yang lebih rendah
- c) Produksi CO dan H<sub>2</sub> yang lebih tinggi

Umumnya ada lima tahapan proses pada reaktor gasifikasi plasma :

1. Tahap pertama sebagai reaksi awalan adalah *drying* (pengeringan). Kandungan air pada sampah harus dikurangi dengan memberikan pemanasan. Molino *et al.* (2016) menyatakan bahwa jumlah kalor yang dibutuhkan untuk mengeringkan sampah sebanding dengan nilai kelembaban dari sampah tersebut. Faaij (2004) menyatakan bahwa proses pengeringan ini dapat dikatakan selesai, bilamana temperature pada proses ini mencapai 150 °C. Laju kalor yang dibutuhkan untuk pengeringan, dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{feedstock} \cdot (1 - X_{moisture} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) + \dot{m}_{feedstock} \cdot X_{moisture} \cdot (h_{steam.T_{out}} - h_{steam.T_{in}}) \dots\dots\dots (1)$$

2. Tahap kedua yang terjadi dalam proses pembentukan *syngas* adalah *pyrolysis*. Dekomposisi termokimia terjadi pada tahap ini, dari material karbon berantai panjang menjadi rantai pendek dengan berat molekul yang lebih kecil, dan dapat dikelompokkan menjadi dua komponen, yaitu *Volatile Matter* (VM) dan Arang (*Char*). *Volatile Matter* terdiri dari gas seperti H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, tar (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> dan *Char*

terdiri dari batuan arang (*fixed carbon*) serta abu (*ash*). Komposisi dari produk tersebut di atas dapat diperoleh dengan melakukan analisis *proximate* dan *ultimate* dari sampah perkotaan (MSW). Molino *et al.* (2016) menyatakan bahwa pirolisis terjadi pada rentang temperatur antara 250-700 °C. Tan (2018) menyatakan bahwa temperatur *Quenching Zone* dari Reaktor Gasifikasi, diharapkan berada pada kondisi panas, sehingga tar dapat keluar sebagai *vapor* sebelum memasuki *tar cracking reactor* (dimana *plasma torch* berada).

Pada proses pirolisis ini, dapat diperoleh fraksi sebagai berikut :

- a. Fraksi padat. Li (2004) menyatakan bahwa komposisi fraksi padat antara 20-25 % berat dengan kandungan karbon yang tinggi dan ditandai dengan adanya HHV, yang dapat berupa abu (*ashes*) ataupun karbon tetap (*fixed carbon*).
  - b. Fraksi cair (*liquid*) disebut sebagai *tar*. Roos (2010) menyatakan fraksi cair dengan komposisi 1 % berat pada *downdraft fixed bed reactor*, terdiri dari substansi organik yang kompleks dan terkondensasi pada temperature yang rendah.
  - c. Fraksi gas. Roos (2010) menyatakan fraksi gas biasanya dengan komposisi 70-80 % berat dari material feedstock dan merupakan campuran dari gas yang tidak dapat terkondensasi pada temperature ambient. Fraksi gas ini utamanya terdiri dari hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, hidrokarbon ringan seperti metana dan hidrokarbon C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> lainnya, serta sedikit asam dan gas *inert*.
3. Tahap ketiga yang terjadi adalah reaksi *char combustion & gasification*. Pada proses pengeringan dan *pyrolysis* menghasilkan *char* sebagai produk berbentuk *fixed carbon* dan *ash*. *Char* tersebut akan tergasifikasi dan terjadi *partial combustion*, karena mendapat sulangan GA untuk membentuk CO dan CO<sub>2</sub>. *Partial combustion* terjadi pada reaksi gasifikasi karena tergolong eksotermik dan akan menghasilkan kalor yang dibutuhkan untuk *drying*, *pyrolysis* dan proses *melting*. Rentang

temperature pada tahap ini antara 800-1100 °C. Proses ini akan menerapkan teori *Gibbs Free Energy* dimana kesetimbangan fase dan kimia diasumsikan terjadi, akibat temperature yang tinggi dari *char combustion*. Bilamana terjadi perubahan pada *Gibbs Free Energy* berarti terjadi reaksi dengan perlakuan. Untuk menentukan *Gibbs Free Energy* pada temperature dan tekanan yang sama, dapat dituliskan seperti pada Persamaan 2.

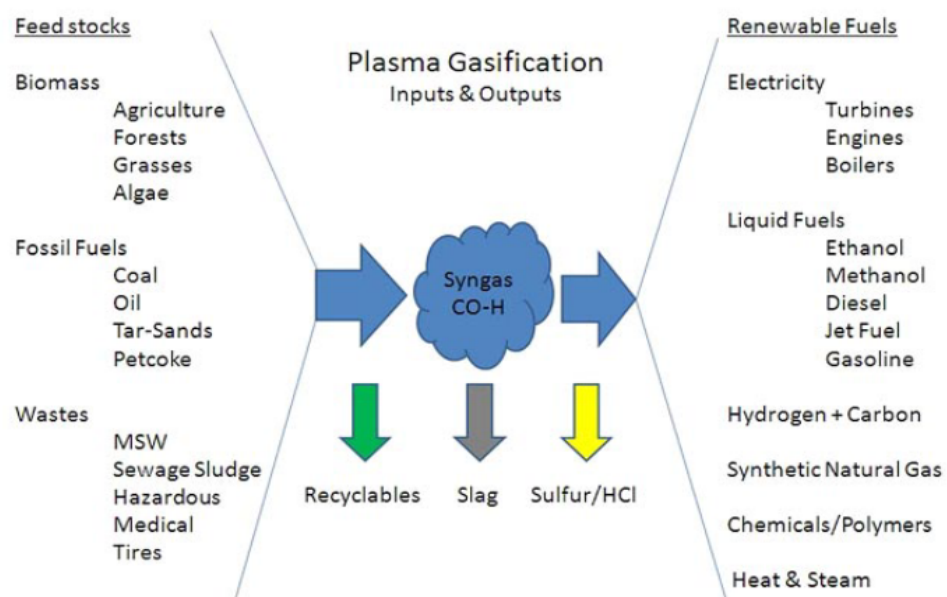
$$dG_{system} = dH_{system} - TdS_{system} \dots\dots\dots(2)$$

Untuk mencapai komposisi yang seimbang, maka *Gibbs Free Energy* dapat dituliskan seperti pada Persamaan 3.

$$dG_{system} = 0 \dots\dots\dots(3)$$

4. Tahap keempat yang terjadi adalah *melting* (peleburan). *Ash* yang dihasilkan dari reaksi *char gasification* terdiri dari komponen *inorganic* dari *feedstock*, dilebur menggunakan kalor yang berasal dari proses oksidasi parsial pada tahap *char combustion*. Temperature yang tinggi ini diperoleh dari *combustion* tersebut, cukup untuk meleburkan *ash* menjadi *slag* yang mengalir melalui dasar dari *gasifying*. Tan (2018) menyatakan bahwa untuk sampah perkotaan, komposisi *ash* nya biasanya terdiri dari 70% SiO<sub>2</sub>, 13% CaO, 9% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan 8% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
5. Tahap kelima adalah *plasma tar cracking*. *Tar cracking* adalah proses memecah molekul kompleks besar seperti tar menjadi gas yang lebih ringan oleh paparan panas dari termal plasma. Proses ini sangat penting untuk produksi gas bersih, karena gas *tar* mengembun menjadi tar lengket yang dengan cepat akan mengotori mesin / sistem. Dalam proses pembakaran, suhu tinggi yang dihasilkan, mendekomposisi molekul tar yang berukuran besar yang melewati zona pembakaran. Tan (2018) menyatakan bahwa *tar* yang terjadi umumnya *Naphtalene*, *Toluene* dan *Benzen*. Rentang temperature antara 1000-1600 °C. Karena temperature yang sangat tinggi, diasumsikan reaksi yang terjadi sangat cepat, dengan meminimalkan *Gibbs Energy*.

Gasifikasi plasma beroperasi pada suhu tinggi di atas 2500 K, terjadi pembentukan ionisasi gas serta radikal bebas dan keberadaannya mempercepat reaktivitas kimia. Laju reaksi sangat tinggi di dekat sumber plasma; akibatnya waktu tinggal yang diperlukan sangat rendah dibandingkan dengan gasifikasi konvensional. Ini secara drastis mengurangi laju aliran masa GA yang beroperasi pada tekanan atmosfer. Verma (2018) menyatakan bahwa gasifikasi plasma merupakan proses yang ramah lingkungan karena bahan kimia beracun seperti dioksin, furan, dan sebagainya, tidak terbentuk pada suhu tinggi yang berlaku.

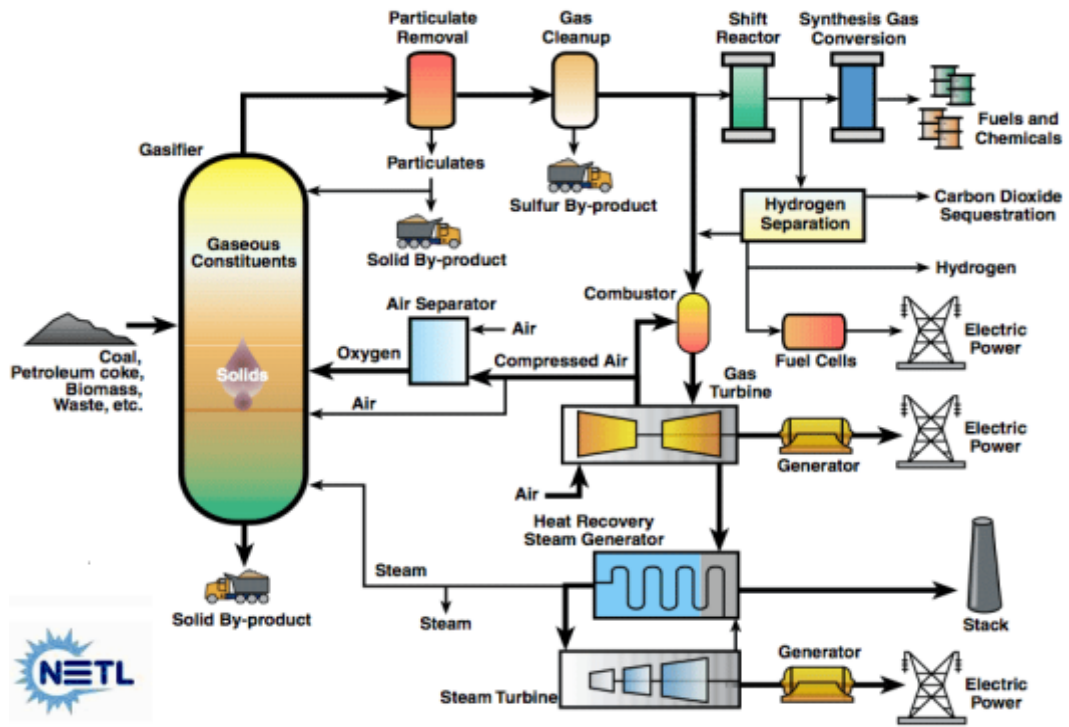


Gambar 2. 5 Antara *Input / Output* Gasifikasi Plasma (Dodge, 2008)

*Syngas* hasil produksi Gasifikasi Plasma seperti terlihat pada Gambar 2.5, dapat digunakan pada berbagai jenis industri. Mountouris *et.al* (2006) menyatakan bahwa sub-sistem pembersihan gas, seperti terlihat pada Gambar 2.6, dapat eliminasi HCl, SO<sub>x</sub>, partikel tersuspensi, logam berat dan uap dari *syngas*. Reaktor Gasifikasi Plasma dapat diintegrasikan pada siklus uap, siklus turbin gas, mesin gas atau *fuel cell*, tergantung pada kualitas gas sintesis yang dihasilkan.

Fabry (2013) menyatakan bahwa *syngas* utamanya terdiri dari Karbon Monoksida (CO) dan Hidrogen (H<sub>2</sub>) dengan sejumlah kandungan senyawaan lainnya seperti Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>), Air (H<sub>2</sub>O), Metana (CH<sub>4</sub>), Nitrogen (N<sub>2</sub>)

dan Argon (Ar) dan padatan seperti karbon (*ash*), dan sejumlah *tar*.



Gambar 2. 6 Sistem Konversi Energi Gasifikasi Plasma (Dodge, 2008)

A. Mountouris, *et.al* (2006) menyatakan bahwa selama proses gasifikasi plasma, berbagai reaksi kimia terjadi. Model berdasarkan kesetimbangan termodinamika telah digunakan secara luas, dan dilakukan studi parameter proses yang terkait dengan reaksi gasifikasi global ditulis pada table 2.1

Tabel 2. 1 Reaksi Kimia Gasifikasi Global

No	Reactions	
R1	$Moist\ Feedstock \rightarrow Feedstock + H_2O(g)$	(Faaij, 2004)
R2	$Feedstock \rightarrow H_2 + CO + CO_2 + CH_4 + H_2O(g) + Tar + Char$	(Tan, 2018)
R3	$CH_xO_y + wH_2O + mO_2 + 3.76mN_2$	(Mountouris, 2006)
	$\rightarrow n_1H_2 + n_2CO + n_3CO_2 + n_4H_2O + n_5CH_4 + n_6N_2 + n_7C$	
R3a	Carbon balance : $1 = n_2 + n_3 + n_5 + n_7$	
R3b	Hydrogen balance : $2w + 1.44 = 2n_1 + 2n_4 + 4n_5$	
R3c	Oxygen balance : $w + 0.66 + 2m = n_2 + 2n_3 + n_4$	

di mana  $w$  adalah jumlah air per kmol sampah,  $m$  adalah jumlah oksigen per kmol sampah,  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$  dan  $n_7$  adalah koefisien dari produk gas dan *ash*. Mengacu pada Tabel 2.1 Reaksi R3 dan disubstitusi dengan R3a, R3b dan R3c, maka diperoleh MSW adalah  $CH_{1.44}O_{0.66}$ .

Reaksi yang terjadi di dalam reactor Gasifikasi Plasma, seperti terlihat pada Tabel 2.2, merupakan reaksi detail yang dapat menjelaskan terbentuknya Hidrogen dan Karbon Monoksida.

Tabel 2. 2 Reaksi Kimia Gasifikasi Detail

No	Reactions	$\Delta H$ (kJ/mol)	Type
R4	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ ( <i>Heterogenous Water Gas</i> )	+131.0	Endothermic
R5	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ( <i>Water Gas Shift</i> )	-41.0	Exothermic
R6	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ ( <i>Boudouard Equilibrium</i> )	+172.0	Endothermic
R7	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ ( <i>Carbon Combustion</i> )	-393.0	Exothermic
R8	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$ ( <i>Carbon Partial Combustion</i> )	-112.0	Exothermic
R9	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ ( <i>Methanation of Carbon</i> )	-74.0	Exothermic
R10	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ ( <i>Hydrogen Partial Combustion</i> )	-242.0	Exothermic
R11	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ ( <i>Steam Reforming of Methane</i> )	+206.0	Endothermic
R12	$H_2 + S \rightarrow H_2S$ ( <i>H<sub>2</sub>S Formation</i> )	-20.2	Exothermic
R13	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$ ( <i>CO Partial Combustion</i> )	-283	Exothermic
R14	$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$ ( <i>Steam Reforming of Methane</i> )	+165.0	Endothermic

Reaksi kimia *water gas shift* seperti pada Tabel 2.2 R5, adalah reaksi reduksi karbon monoksida oleh uap untuk memproduksi hydrogen dengan proses furifikasi / pemurnian Hidrogen yang berasal dari *Syngas*. Niwarlangga, (2016) menyatakan bahwa *Water Gas Shift Reaction* berfungsi untuk mereduksi fraksi mol CO dan memperbesar *Yield Hidrogen*

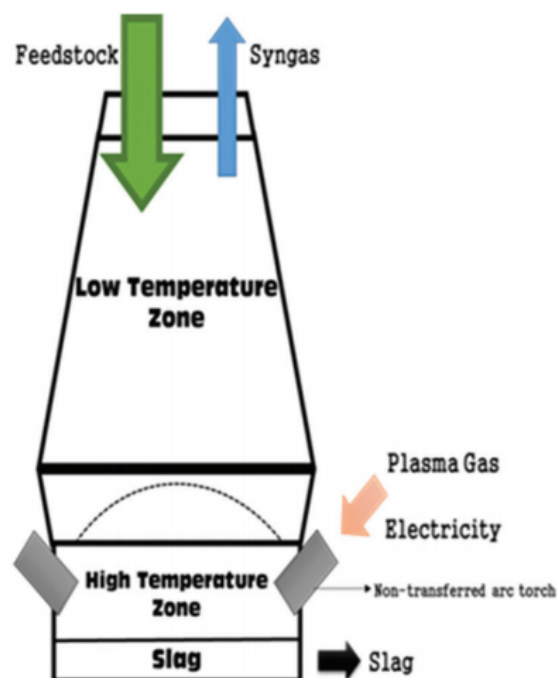
Vinod C. Khera, (1968) menyatakan bahwa reaksi kimia *CO Partial Combustion* seperti pada Tabel 2.2 R13 adalah reaksi oksida katalitik dari Karbon

Monoksida untuk menghasilkan energi, dengan nilai entalpinya eksotermik sebesar 283 kJ/mol lebih tinggi daripada reaksi water gas shift, yaitu eksotermik sebesar hanya 41 kJ/mol.

Lorcet (2009) menyatakan bahwa diharapkan bahwa dengan penggunaan gasifikasi plasma akan meningkatkan perolehan massa dan kualitas *syngas*, akibat dari temperatur yang tinggi, tingkat entalpi yang tinggi, serta kandungan elemental senyawa *oxygenated* yang reaktif seperti radikal bebas dan ion

#### 2.4 Pemodelan pada Gasifikasi Plasma

Dalam proses simulasi ini, menggunakan pemodelan berdasar dari kesetaraan termodinamika, yang telah banyak digunakan untuk mengetahui pengaruh dari parameter penting pada sampah dan proses pengolahannya.

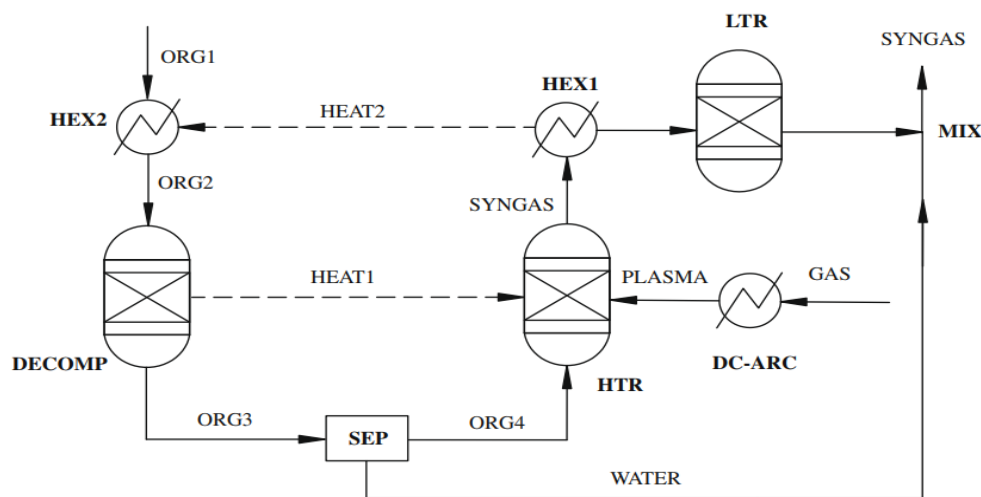


Gambar 2. 7 Diagram Reaktor Gasifikasi Plasma (Sikarwar, 2016)

Mountouris *et al.* (2006) telah melakukan analisis termodinamika dari proses gasifikasi plasma, dengan turut serta melakukan prediksi dari hasil produksi syngas serta analisis energinya. Minutillo *et al.* (2009) menyatakan bahwa model

kesetaraan (*equilibrium model*) telah digunakan untuk mempelajari proses gasifikasi plasma

Pada Gambar 2.7 di atas, merupakan gambaran nyata dari reaktor gasifikasi plasma dengan tipe *updraft*, dan pada Gambar 2.8 di bawah, merupakan pemodelan dari reaktor gasifikasi plasma yang mengacu pada penelitian (Minutillo, 2009), yang disebut sebagai EquiPlasmaJet (EPJ).



Gambar 2. 8 Model EquiPlasmaJet (Minutillo, *et.al*, 2009)

Pada Gambar 2.8, model EquiPlasmaJet (EPJ) terdiri dari berbagai blok diagram. Blok diagram itu masing-masing memiliki fungsi sendiri. Block diagram DECOMP beserta HEX2 serta SEP, terjadi proses akumulasi sampah, pengeringan / evaporasi dan dekomposisi sampah serta separasi sampah dengan moisture/air, sehingga kelembaban sampah dapat berkurang, terjadi pada *Low Temperature Zone*, dimana *feedstock* sampah dimasukkan. Blok diagram HTR dan HEX1, dimana terdapat *plasma torch*, memiliki temperatur yang tinggi, sekitar 2500 °C, dimana terjadi proses gasifikasi pada PGZ. Pada blok diagram LTR terjadi reaksi kimia non-stoikiometri, memiliki temperatur yang terjadi lebih rendah, sekitar 1250 °C.

*Excess heat* yang terjadi pada block diagram HTR, divisualisasikan kepada HEX1 untuk ditransfer kepada HEX2, untuk memvisualisasikan panas yang diberikan dari *High Temperature Zone* kepada *Low Temperature Zone*, melalui pergerakan *Syngas* dari *High Temperature Zone* ke *Low Temperature Zone* untuk



menuju *outlet Syngas* di dalam reaktor gasifikasi plasma. Pergerakan *Syngas* ini, juga membawa kalor melewati *Quenching Zone*, ada *feedstock* sampah. *Feedstock* sampah yang baru masuk dan terpapar kalor dari *Syngas*, akan mengalami proses pengeringan serta dekomposisi. Sedangkan *excess heat* yang terjadi pada *block diagram* DECOMP, dengan adanya gaya gravitasi, *feedstock* yang telah terpapar kalor dari *syngas* tersebut, akan membawa sisa kalor tersebut kembali ke *block diagram* HTR.

Penjelasan dari blok diagram yang digunakan pada model EPJ 2.8. dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Blok diagram pada model EPJ

Block Name	Block Type	Description
DECOMP	RYield	Non-Stoichiometric reactor based on known Yield Distribution from Calculator Feature
HTR & LTR	RGibbs	Rigorous Hydrate Reactor and multiphase equilibrium based on Gibbs Free Energy Minization
HEX1 & HEX2	Heater	Simple Thermal heat exchanger
SEP	Separator	Water separation from Feedstock
DC-ARC	Heater	Simple Electric Thermal Conversion
MIX	Mixer	Material Stream Mixer

Perangkat *Plasma Torch*, yang dimodelkan sebagai blok diagram DC-ARC, akan mengkonversi daya listrik menjadi kalor yang dibutuhkan untuk membangkitkan plasma termal. Estimasi daya yang dibutuhkan oleh *plasma torch*, melalui daya kalor yang dipindahkan ke GA, tetap memperhitungkan faktor efisiensi internal dari *torch* tersebut. Daya yang dibutuhkan berbeda-beda tergantung dari jenis GA yang digunakan. Aliran plasma dari DC-ARC menuju blok diagram HTR, tetap berada pada PGZ dari reaktor gasifikasi plasma.

## 2.5 Feedstock MSW Gasifikasi

Untuk *feedstock* yang akan digunakan sebagai inputan untuk pemodelan ini, menggunakan *feedstock* sampah perkotaan dari TPA Jatibarang, Semarang. Young

(2010) menyatakan bahwa dalam analisis proses *waste to energy* diperlukan sifat-sifat dari sampah perkotaan yaitu melalui analisis *proximate*, analisis *ultimate* dan *calorific value* dengan penjelasan sebagai berikut :

#### A. *Ultimate Analysis*.

Basu (2013) menyatakan bahwa *ultimate analysis* adalah komposisi hidrokarbon bahan bakar yang dinyatakan dalam unsur elemen dasar yaitu C, H, O, N, Cl dan S. Kandungan C, H, O, N, Cl dan S adalah presentase massa karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan belerang dalam bahan bakar. Salah satu metode standar yang digunakan untuk *coal ultimate analysis* adalah ASTM D5373 – 13 *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke* (ASTM D 5373-13, 2013) dengan cara memasukkan sampel karbon ke dalam alat uji yang menggunakan teknik infra merah dan hasil analisis akan muncul kemudian pada display alat uji. Penentuan kadar O dari komposisi hidrokarbon bahan bakar dapat dilihat pada persamaan 4.

$$O[\%] = 100[\%] - (C[\%] + H[\%] + N[\%] + S[\%] + Cl[\%]) \dots\dots\dots(4)$$

#### B. *Proximate Analysis*

Basu (2013) menyatakan *proximate analysis* adalah analisis yang memberikan komposisi biomassa dalam hal komponen kelembaban (M), zat terbang (Volatile Matter), abu (ASH) dan karbon tetap (Fixed carbon). Zat Terbang (Volatile Matter). Salah satu standar metode untuk *coal proximate analysis* adalah ASTM D7582-12 *Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis* (ASTM D 7582-15, 2015), yaitu dengan sampel sampah ukuran 60 mesh (sesuai standar alat ukur), yang ditempatkan dalam cawan (*crucible*) dan dimasukkan tungku dalam peralatan. Hasil analisis akan terbaca pada display alat uji.

- i. *Volatile matter* atau zat terbang adalah kandungan dari bahan bakar yang dapat terkondensasi dan atau tidak terkondensasi pada saat

dipanaskan. Jumlah dari zat terbang tergantung pada tingkat pemanasan dan suhu pemanasan yang digunakan.

- ii. Abu (*ash*). *Ash* atau abu adalah residu padat anorganik yang tersisa setelah material terbakar. Bahan utama dari abu adalah silika, aluminium, besi, dan kalsium, serta sejumlah kecil magnesium, titanium, natrium dan kalium.
- iii. Karbon tetap (*Fixed Carbon*). *Fixed carbon* atau karbon tetap adalah jumlah karbon padat dalam bahan bakar di dalam proses pirolisis setelah devolatilisasi. Karbon tetap ditentukan dari Persamaan 5.  

$$FC[\%] = 100[\%] - (Ash[\%] + VM[\%]) \dots\dots\dots(5)$$
- iv. Kelembaban (*Moisture*) / *Water Content*. Kadar air atau kelembaban yang tinggi merupakan karakteristik utama dari biomassa. *Free moisture* adalah kandungan air pada *biomassa* yang terletak diluar dinding sel *biomassa*. Sedangkan untuk *inherent moisture* adalah kandungan air yang melekat pada dinding-dinding sel biomasa.

### C. *Calorific Value*

Zafar (2019) menyatakan bahwa *calorific value* adalah jumlah panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di laboratorium. Pembakaran dilakukan pada kondisi standar tekanan dan temperatur dan volume tetap.

Parameter *Ultimate Analysis* sampah perkotaan dari TPA Jatibarang, Semarang dapat dilihat pada Tabel 2.4 :

Tabel 2.4 Parameter Analisis *Ultimate* (Khuriati, 2018)

Ultimate Analysis (wt. % db)	
Ash	9.51
C	43.71
H	7.74
N	1.95
Cl	0
S	0.40
O	36.69

Parameter *Proximate Analysis* sampah perkotaan dari TPA Jatibarang, Semarang dapat dilihat pada Tabel 2.5 :

Tabel 2. 5 Parameter Analisis *Proximate* (Khuriati, 2018)

Proximate Analysis (wt. %)	
Fixed Carbon	12.82
Volatile Matter	77.66
Ash	9.51
Water Content	20

Parameter *Calorific Value* sampah perkotaan dari TPA Jatibarang, Semarang dapat dilihat pada Tabel 2.6 :

Tabel 2. 6 Parameter *Calorific Value* (Khuriati, 2018)

Calorivic Value (kJ/kg)	
HHV	18530.4
LHV	16013.6

## 2.6 Parameter Proses Gasifikasi

Parameter Proses dalam Gasifikasi Plasma sebagai berikut :

### A. Temperatur dari proses gasifikasi plasma terbagi menjadi

#### i. Temperatur Gasifying Agent.

Doherty (2009) menyatakan bahwa GA yang dipanaskan sebelumnya dapat memberikan energi tambahan ke dalam reaksi gasifikasi yang meningkatkan dekomposisi termal dari MSW, dan mempromosikan reaksi endotermik.

#### ii. Temperatur dari *Plasma Gasification Zone*

Verma *et al.* (2018) menyatakan bahwa dalam reaktor gasifikasi plasma, terbagi atas dua zona temperatur, yaitu zona panas yaitu *Plasma Gasifikasi Zone* (PGZ) dan zona dingin, yaitu *Quenching Zone*. Pada PGZ, terjadi proses termokimia, yaitu *pyrolysis*,

*combustion & reduction*. Pada zona dingin, terjadi proses termokinetik.

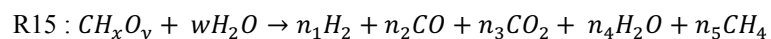
#### B. Tipe dari GA

Speight (2014) menyatakan bahwa GA biasanya udara, udara yang diperkaya oksigen, atau oksigen dan produk-produk dari pembakaran atau reaksi oksidasi gasifikasi yang berubah secara signifikan ketika rasio oksigen ke bahan bakar berubah dari pembakaran ke kondisi gasifikasi, yang tergantung pada desain dan operasi gasifying. Tipe dari GA pada umumnya berupa gas antara lain oksigen, udara, uap, karbon dioksida, atau campuran dari semuanya. Diaz (2015) dan Gil (1999) menyatakan bahwa GA yang memiliki kinerja terbaik ialah uap, karena akan menghasilkan Hidrogen dengan fraksi mol terbesar, untuk semua jenis MSW. atau untuk semua jenis biomassa.

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa jenis GA, yaitu :

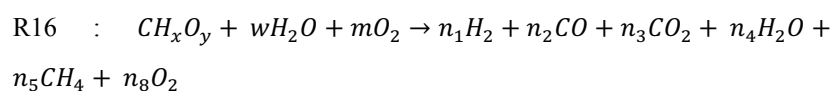
##### i. Uap

Dalam penggunaan jenis GA ini, maka reaksi spesifik dari R3 pada tabel 2.1 menjadi R15



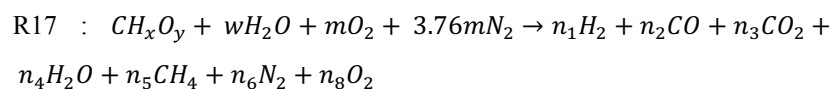
##### ii. Campuran Uap dan Oksigen

Dalam penggunaan jenis GA ini, maka reaksi spesifik dari R3 pada tabel 2.1 menjadi R16



##### iii. Campuran Uap dan Udara

Dalam penggunaan jenis GA ini, maka reaksi spesifik dari R3 pada tabel 2.1 menjadi R17



#### C. Jenis rasio yang dipergunakan dalam proses gasifikasi, antara lain :

##### i. Rasio Keseimbangan (*Equivalent Ratio*)

Bermudez (2016) menyatakan bahwa ER adalah sebagai perbandingan antara udara aktual pada bahan bakar dibagi dengan

udara dalam kondisi stoikiometri pada bahan bakar dengan pembakaran sempurna, seperti dapat dilihat di Persamaan 6:

$$ER = \frac{air\ actual/feedstock}{stoichiometric\ air/feedstock} \dots\dots\dots(6)$$

Persamaan 7 digunakan untuk sebagai input simulasi ASPEN Plus

$$\dot{m}_{air} = air\ actual * \dot{m}_{waste} \dots\dots\dots(7)$$

Dalam kondisi bilamana nilai ER meningkat, maka kandungan CO<sub>2</sub> juga meningkat, sementara kandungan CO akan menurun, dengan terjadinya reaksi oksidasi. Berkurangnya H<sub>2</sub> juga diamati pada *feedstock* yang digunakan, karena terjadinya reaksi oksidasi, yaitu pada medium reaksi yaitu GA nya terkandung lebih banyak oksigen. Favas (2017) menyatakan bahwa bilamana terjadi peningkatan ER, maka akan lebih banyak udara yang masuk / menjadi GA, yang secara otomatis akan meningkatkan kandungan N<sub>2</sub> dan akan mengurangi LHV dari *syngas*.

ii. *Oxygen Ratio*

Mueller (2004) menyatakan bahwa rasio oksigen itu sebagai kebalikan dari ER atau pengukuran dari *proximity* campuran reaktan pada kondisi stoikiometrinya, seperti terlihat pada Persamaan 8.

$$\Omega = oxygen\ stoic + \frac{(1 - oxygen\ stoic)}{ER} \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan 9 digunakan untuk sebagai input simulasi ASPEN Plus

$$\dot{m}_{oxygen} = \Omega * \dot{m}_{waste} \dots\dots\dots(9)$$

Lv, (2007) menyatakan bahwa penggunaan Oksigen sebagai GA dengan penambahan uap diharapkan dapat meningkatkan *syngas* LHV dan performa Gasifikasi. Ngamchompoo (2017) menyatakan bahwa penggunaan Oksigen sebagai GA memiliki kekurangannya, yaitu membutuhkan biaya yang lebih besar, karena untuk memproduksi oksigen.

iii. *SWR (Steam to Waste Ratio)*

Ialah perbandingan antara laju aliran massa *Uap* dengan laju aliran massa sampah dalam kondisi kering. Favas (2017) menyatakan

bahwa penggunaan *uap* sebagai GA digunakan dalam pengayaan fraksi mol H<sub>2</sub> dalam produk akhir. Ngamchompoo (2017) menyatakan bahwa penggunaan uap yang berlebih akan mengurangi kualitas dari gas yang dihasilkan.. Persamaan 10 digunakan untuk menentukan laju aliran masa uap.

$$SWR = \frac{\text{Steam mass flow}}{\text{MSW mass flow}} \dots\dots\dots(10)$$

## 2.7 Parameter Kinerja Gasifikasi

Parameter Kinerja digunakan untuk menentukan kriteria optimasi, yang diuraikan sebagai berikut :

### A. Fraksi Mol Syngas

Nic, *et al.* (2005) menyatakan bahwa fraksi mol (*Mole Fraction*) ialah sejumlah senyawa kimia yang dibagi dengan sejumlah total seluruh senyawa dalam campuran gas seperti terlihat di Persamaan 11.

$$x_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \dots\dots\dots(11)$$

Dengan  $n_i$  sebagai jumlah senyawa kimia

$n_{tot}$  sebagai jumlah total senyawa kimia

### B. Emisi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>

Persamaan 12 digunakan untuk menentukan laju emisi dari CO<sub>2</sub>.

$$\text{Laju Emisi CO}_2 = v * \frac{\kappa_{CO_2}}{100} * \frac{m_C}{m_{CO_2}} * \delta_{CO_2} \dots\dots\dots(12)$$

Persamaan 13 digunakan untuk menentukan laju emisi dari CH<sub>4</sub>.

$$\text{Laju Emisi CH}_4 = v * \frac{\kappa_{CH_4}}{100} * \frac{m_C}{m_{CH_4}} * \delta_{CH_4} \dots\dots\dots(13)$$

Dengan  $v$  = syngas volumetric flow (m<sup>3</sup>/s)

$\kappa$  sebagai molar fraction dari gas yang dituju (%)

$m$  sebagai massa molekul dari material yang dituju

$\delta$  sebagai densitas dari gas yang dituju (kg/m<sup>3</sup>)

### C. Yield Syngas

Hasil (*Yield*) secara kimia, adalah sejumlah produk yang diperoleh melalui reaksi kimia, yang ditentukan dengan Persamaan 14.

$$Yield = \frac{V}{m} \dots \dots \dots (14)$$

Dengan

V sebagai jumlah volume produk dari reaksi kimia (Nm<sup>3</sup>)

m sebagai jumlah massa bahan baku untuk reaksi kimia (kg)

#### D. LHV Syngas

Favas (2017) menyatakan bahwa Nilai Pembakaran Rendah (Low Heating Value) *Syngas* adalah nilai pembakaran / kalor yang diperoleh dengan membakar sejumlah bahan bakar dikurangi kalor penguapan dari air dalam proses pembakaran.. Perhitungan LHV *Syngas*, menggunakan Persamaan 15.

$$LHV_{Syngas} = HHV - 10.79Y_{H_2} + 12.62Y_{CO} + 35.81Y_{CH_4} \dots \dots \dots (15)$$

Dengan

LHV *syngas* sebagai *low heating value* (MJ/Nm<sup>3</sup>)

Y sebagai fraksi volume dari setiap komponen dalam *syngas* pada kondisi kering (Nm<sup>3</sup>)

#### E. Efisiensi Konversi Karbon dan Efisiensi Konversi Air

Yong-Chil Seo (2018) menyatakan bahwa efisiensi konversi karbon ialah perbandingan dari jumlah kandungan karbon di dalam *syngas* dengan jumlah kandungan karbon di dalam *feedstock* (MSW). Perhitungan Efisiensi Konversi Karbon, menggunakan Persamaan 16.

$$X_c = \left[ \frac{LHVSyngas * (CO\% + CO_2\% + CH_4\% + COS\%)}{LHVMSW * C\%} \right] * 100\% \dots \dots \dots (16)$$

Dengan :

X<sub>c</sub> sebagai adalah efisiensi konversi karbon (%)

C sebagai prosentase massa dari carbon di dalam *feedstock biomass*

CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, COS sebagai prosentase molar dari komponen gas hasil.

Hofbauer (2008) menyatakan bahwa efisiensi konversi air ialah perbandingan dari selisih dari penjumlahan kandungan air di dalam *feedstock* MSW dan dalam kandungan GA dengan jumlah kandungan air di dalam *syngas* dibandingkan dengan jumlah kandungan air di



dalam *feedstock* MSW dan kandungan air di dalam GA. Perhitungan Efisiensi Konversi Air, dengan menggunakan Persamaan 17.

$$X_w = \frac{\text{sum water input } \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) - \text{sum water output } \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)}{\text{sum water input } \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)} * 100\% \dots\dots\dots(17)$$

Dengan  $X_w$  sebagai efisiensi konversi air (%)

#### F. Efisiensi Gasifikasi Dingin

Chumak (2015) menyatakan bahwa efisiensi gasifikasi dingin (Cold Gasification Efficiency) ialah perbandingan antara kandungan energi kimia pada *Syngas* dibandingkan dengan penjumlahan antara energi kimia yang terkandung dalam MSW dan daya listrik yang dikonsumsi oleh *Plasma Torch*. Perhitungan efisiensi gasifikasi dingin menggunakan Persamaan 18.

$$CGE = \frac{LHV_{\text{syngas}} F_{\text{syngas}}}{LHV_{\text{MSW}} \dot{m}_{\text{MSW}} + P_{\text{plasma}}} * 100\% \dots\dots\dots(18)$$

Nett Efisiensi Gasifikasi Dingin

Nett Efisiensi Gasifikasi Dingin (Nett-CGE) ialah perbandingan antara kandungan energi kimia pada *Syngas* dibandingkan dengan penjumlahan antara energi kimia yang terkandung dalam MSW, daya listrik yang dikonsumsi oleh *Plasma Torch* serta daya listrik yang dikonsumsi untuk menghasilkan *GA uap* dan oksigen. Perhitungan Nett Efisiensi Gasifikasi Dingin menggunakan Persamaan 19.

$$\text{Net CGE} = \frac{LHV_{\text{syngas}} F_{\text{syngas}}}{LHV_{\text{MSW}} \dot{m}_{\text{MSW}} + P_{\text{torch}} + P_{\text{oxygen}} + P_{\text{steam}}} * 100\% \dots\dots\dots(19)$$

Dengan

CGE sebagai *cold gasification efficiency* (%)

Net CGE sebagai *Nett cold gasification efficiency* (%)

$LHV_{\text{syngas}}$  sebagai *low heating value syngas* (MJ/Nm<sup>3</sup>)

$F_{\text{syngas}}$  sebagai *volumetric flow rate of syngas* (Nm<sup>3</sup>/hr)

$\dot{m}_{\text{MSW}}$  sebagai *laju aliran masa of MSW* (kg/hr)

$LHV_{\text{MSW}}$  sebagai *low heating value MSW* (MJ/kg)

$P_{\text{Torch}}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Plasma Torch* (kW)

$P_{\text{Steam}}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Steam Generator* (kW)

$P_{Oxygen}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Oxygen Gen* (kW)

G. Potensi energi listrik yang dihasilkan

Potensi energi dari proses gasifikasi plasma ini berada pada gas Hidrogen, yang dapat dikonversi menjadi LHV untuk Gasoline. Langkah selanjutnya ialah LHV Gasoline tersebut dikonversikan menjadi Potensi Energi Listrik menggunakan faktor ekuivalensi gasoline ke listrik. Persamaan 20 digunakan untuk menghitung nilai normalisasi dari nilai volume Syngas, yang merupakan rasio pada kondisi operasi dengan kondisi ambient.

$$N = \frac{(273.15 + T_{syngas})}{(273.15 + T_{ambient})} \dots\dots\dots(20)$$

Persamaan 21 digunakan untuk menghitung Potensi Energi Listrik yang dihasilkan.

$$Potensi\ Energi\ Listrik = Y * \frac{\kappa H_2}{100} / N * \delta H_2 * GGE/CF \dots\dots\dots(21)$$

Persamaan 22 digunakan untuk menghitung Nett Potensi Energi Listrik, yang merupakan Potensi Energi listrik dikurangi dengan energi untuk *Uap*, Oksigen serta separasi Hidrogen dengan Karbon Monoksida.

$$NettPotensi\ EnListrik = Potensi\ Energi\ Listrik - P_{Sep} + P_{Torch} + P_{Steam} + P_{Oxygen} \dots\dots\dots(22)$$

Dengan Potensi Energi Listrik (kW)

*Nett* Potensi Energi Listrik(kW)

Y sebagai *Syngas Yield* (Nm<sup>3</sup>/kg)

$\kappa$  sebagai *molar fraction* (%)

N sebagai *Normalized*

$\delta$  sebagai densitas (kg/m<sup>3</sup>)

GGE sebagai *Gasoline Galon Equivalent* (kg) = 1.019

CF sebagai *Conversion Factor* (1/kWh) = 0.031

$P_{Torch}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Plasma Torch* (kW)

$P_{Steam}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Steam Generator* (kW)

$P_{Oxygen}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi oleh *Oxygen Gen* (kW)

$P_{Sep}$  sebagai daya listrik yang dikonsumsi untuk separasi H<sub>2</sub> & CO (kW)