

## ANALISIS TERMAL PEMBAKARAN SAMPAH DOMESTIK PADA INSINERATOR TIPE PPF – GF.CCB 1.50

Mamat<sup>(1)</sup>, Priyo Sardjono<sup>(2)</sup>, Ardeniswan<sup>(3)</sup>

Pusat Penelitian Fisika – LIPI<sup>(1,2,3)</sup>

Jln.Sangkuriang (komplek LIPI) No. 21/154D, Bandung 40135

Telp : (022) 250 3052, 250 7773 – Fax : (022) 250 3050

E – mail : ir\_mamat@yahoo.com<sup>(1)</sup>

### Abstrak

Sampah domestik umumnya terdiri dari 98 % sampah organik dan 2 % sampah anorganik. Sampah organik terdiri sampah 89.84 % sampah gradable dan 10.16 % sampah degradable, sampah gradable rata – rata mempunyai kandungan air 60 – 70 (%) dan mempunyai heating value rata – rata adalah 4136 kJ/kg. Insinerator tipe PPF – GF CCB 1.50 mempunyai kapasitas 337.5 kg sampah/jam dan temperatur operasinya 800 – 900 (°C). Burner pada insinerator ini menggunakan bahan bakar Liquid Natural Gas (LNG) jenis Gip mempunyai heating value 38.7 MJ/m<sup>3</sup> dan air/fuel ratio 9.85. Masing – masing burner mempunyai output panas 232 kW, namun diset 90 % dari kapasitas maksimum (208.8 kW). Hasil analisis kebutuhan udara pembakaran diperoleh 3211.6 nm<sup>3</sup>/jam dan gas buang yang terbentuk diperoleh 3834.66 nm<sup>3</sup>/jam. Laju volumetrik gas buang hasil pengukuran diperoleh 4340 nm<sup>3</sup>/jam relatif lebih besar 11.6 % dari volumetrik hasil analisis. Kebutuhan panas untuk mereduksi kadar air sampah dari 60 – 70 (%) menjadi 10 % diperoleh 186 kW. Temperatur bakar sampah 650 °C dan panas jenis sampah 1.8 kJ/kg °C, sehingga kebutuhan panas untuk pembakaran sampah diperoleh 46.5 kW, maka total kebutuhan panas untuk pembakaran sampah diperoleh 232.5 kW. Panas yang terbentuk di dalam ruang bakar utama diperoleh 1014.2 kW dan panas yang terbentuk di dalam ruang bakar kedua diperoleh 1224.1 kW. Temperatur ruang bakar utama hasil analisis diperoleh 724 °C namun temperatur hasil pengukuran diperoleh 779 °C. Temperatur ruang bakar kedua hasil analisis diperoleh 1029 °C namun temperatur hasil pengukuran diperoleh 885 °C.

*Kata kunci : bahan bakar , insinerator, sampah, temperatur, udara*

### PENDAHULUAN

Komposisi sampah yang diumpukan ke ruang bakar insinerator terdiri dari 89.84 % sampah gradable dan 10.16 % sampah degradable. Umumnya di dalam proses pembakaran sampah terbentuk gas hidrokarbon dan kadarnya sangat dipengaruhi oleh indeks oksigen. Gas hidrokarbon yang terkandung di dalam gas buang yang paling dominan umumnya gas karbon monoksida (gas CO) dan mempunyai temperatur bakar 620 °C. Gas CO merupakan salah satu jenis gas beracun yang dihasilkan dari proses pembakaran dan perlu dirubah menjadi gas karbon dioksida (gas CO<sub>2</sub>) dengan memenuhi kebutuhan indeks oksigen pembakarannya. Besarannya kandungan gas hidrokarbon di dalam gas buang sangat dipengaruhi oleh suplai udara ke dalam ruang bakar. Dengan temperatur operasi 783 °C selama 0.5 detik mampu mereduksi gas CO sebanyak 90 %, maka residence time dua detik untuk pembakaran gas hidrokarbon yang terkandung di dalam gas buang akan berubah menjadi gas CO<sub>2</sub>.

Output panas dari burner sangat dipengaruhi oleh tekanan ruang bakar, karena semakin besar tekanan positif di dalam ruang bakar semakin kecil output panasnya. Tekanan positif di dalam ruang bakar menimbulkan hambatan suplai udara dari nosel ke ruang bakar, sehingga indeks oksigen untuk pembakaran tidak dapat dipenuhi guna melaksanakan pembakaran sempurna. Dengan demikian, gas hidrokarbon yang terbentuk relatif lebih tinggi, sehingga temperatur yang dihasilkan oleh pembakaran relatif lebih rendah. Agar supaya tidak terjadi tekanan positif di dalam ruang bakar, maka pressure drop harus relatif lebih kecil dari tarikan cerobong, sehingga tekanan gas di ruang bakar menjadi negatif.

Dengan pertimbangan teknis bahwa temperatur gas buang dibatasi 900 °C untuk mencegah perubahan struktur material dinding ruang bakar, dan kekuatan material tetap konstan dan mampu menahan beban termal. Berdasarkan hasil pengukuran pada beban normal rata – rata temperatur gas buang yang terjadi di dalam ruang bakar kedua 885 – 900 ( °C), sehingga

temperatur ruang bakar relatif lebih rendah dari temperatur busur bata api (1400 °C). Untuk mencegah *over heat*, maka masing – masing ruang bakar dilengkapi sensor pengendali yang dikonek ke *thermo switch* dan panel kontrol, sehingga dapat beroperasi sesuai kebutuhan.

#### KEBUTUHAN UDARA

Data – data sampah yang diperoleh dari Daerah Kotamadya Bandung tahun 2005 dapat mewakili kota – kota yang lainnya, karena yang berubah hanya kuantitas sampah saja, namun kualitasnya relatif sama. Data – data sampah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data – data sampah

No	Jenis Sampah	Kandungan Sampah (%)
01	Kertas	3.13
02	Kayu	0.30
03	Kain	0.48
04	Karet	0.55
05	Plastik	7.86
06	Logam	2.04
07	Glas	1.75
08	Organik	22.73
09	Cello	0.29
10	Tulang	0.0
11	Lain – lain	0.86
Total		100
LHV		41.36 kJ/kg

Komposisi udara yang paling dominan di alam ini yaitu 76.8 % Nitrogen (N<sub>2</sub>) dan 23.2 % Oksigen (O<sub>2</sub>), udara yang diperlukan untuk pembakaran bahan bakar dengan reaksi kimia untuk pembakaran sempurna disebut kebutuhan udara teoritik atau *stoichiometry burning* dapat diperoleh 7.14 kg udara/kg sampah, kondisi alam ini mempunyai kelembaman udara 80 %, sehingga kebutuhan udara untuk pembakaran harus diperhitungkan faktor koreksi yang sangat dipengaruhi oleh temperatur, faktor koreksi dapat dilihat pada Tabel 2.

Temperatur lingkungan diestimasi 30 °C dapat dilihat pada Tabel 2, faktor koreksinya dapat diperoleh 1.035. *Excess air* untuk pembakaran sampah 100 – 200 (%), namun dengan pertimbangan teknis untuk kecepatan

kanakan temperatur pembakaran, sehingga *excess air* diestimasi 1.25 %, maka *ratio* bahan bakar dan udara diperoleh 9.24, dan kebutuhan udara sangat dipengaruhi oleh berat sampah yang dibakar. Untuk kandungan air sampah 60 – 70 (%) setiap meter kubik sampah diperoleh 225 kg, maka berat sampah yang dibakar setiap jamnya diperoleh 337.5 kg. Jadi kebutuhan udara aktual untuk pembakaran sampah (L<sub>1</sub>) adalah 337.5 kg/jam diperoleh 3118.5 kg/jam ≈ 2620.6 mm<sup>3</sup>/jam.

Tabel 2. Faktor koreksi

No	Temperatur ( °C)	Faktor Koreksi
01	0	1.0049
02	10	1.0098
03	20	1.019
04	30	1.033
05	40	1.063

Untuk memenuhi kebutuhan panas pada insinerator ini dipenuhi oleh empat unit *burner* dengan menggunakan bahan bakar *Liquid Natural Gas (LNG)* dan masing – masing *burner* mengkonsumsi bahan bakar sebanyak 18 mm<sup>3</sup>/jam, maka kebutuhan bahan bakar untuk mengoperasikan empat unit *burner* tersebut sebanyak 72 mm<sup>3</sup>/jam. *Ratio* antara bahan bakar gas *LNG* dan udara 1 : 9.85, maka jumlah udara yang dibutuhkan untuk operasional *burner* diperoleh 354.6 mm<sup>3</sup>/jam. Jadi total kebutuhan udara sebanyak 2975.2 mm<sup>3</sup>/jam ≈ 3540.5 kg/jam ≈ 0.98 kg/det. Konstruksi insinerator tipe PPF – GF CCB 1.50 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Insinerator tipe PPF – GF CCB 1.50

#### PRODUK GAS PEMBAKARAN

Gas buang dari hasil pembakaran sempurna yaitu karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), uap air (H<sub>2</sub>O) dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Jadi jumlah gas buang teoritis dari proses pembakaran dapat diperoleh (G<sub>1</sub>) adalah 9.44 kg

gas/kg sampah  $\approx 6.66 \text{ m}^3/\text{kg}$  sampah. Jadi gas buang aktual dapat diperoleh dari rumus sebagai berikut:

$$G_g = (f - 1)L_r + G_r \quad (1)$$

diperoleh  $11.5 \text{ kg}$  gas/kg sampah, maka jumlah gas buang yang terbentuk dari suatu proses pembakaran diperoleh  $3794.13 \text{ m}^3/\text{jam} \approx 3881.3 \text{ kg}/\text{jam} \approx 1.078 \text{ kg}/\text{det}$ .

## ENERGI PANAS

### Ruang Bakar Utama

Sampah dapat dibakar secara efektif pada kandungan air adalah  $10\%$ , kandungan air rata-rata sampah adalah  $60\%$  dan *critical moisture content* adalah  $100\%$ , maka massa air yang harus dievaporasikan selama proses pembakaran berlangsung dapat diperoleh  $187.5 \text{ kg}/\text{jam}$ , panas jenis air  $4.186 \text{ kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$  dan entalpi penguapan  $2256.7 \text{ kJ}/\text{kg}$ . Jadi kebutuhan panas untuk proses evaporasi dapat diperoleh menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\dot{Q}_e = m [c_p (T_s - T_w) + h] \quad (2)$$

diperoleh  $669356.6 \text{ kJ}/\text{jam} \approx 186 \text{ kW}$ . Temperatur bakar sampah diperoleh  $650 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan panas jenisnya  $1.8 \text{ kJ}/\text{kg}$  dan berat sampah pada kandungan air  $60 - 70\%$  diperoleh  $337.5 \text{ kg}$ . Berat sampah pada kandungan air  $10\%$  diperoleh  $150 \text{ kg}$ , maka panas yang dibutuhkan untuk pembakaran sampah diperoleh dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q_b = m_s c_p (T_s - T_{air}) \quad (3)$$

diperoleh  $46.5 \text{ kW}$ , maka total yang dibutuhkan untuk pembakaran sampah ( $Q_{pb}$ ) diperoleh  $\approx 232.5 \text{ kW}$ . Pada ruang bakar utama insinerator ini menggunakan dua unit *burner* yang mempunyai *output* panas  $232 \text{ kW}$  dan efektivitas hanya digunakan  $90\%$  dari kapasitasnya, sehingga *output* panas masing-masing *burner* diperoleh  $208.8 \text{ kW}$ , maka total suplai panas pada ruang bakar utama diperoleh  $626.4 \text{ kW}$ . Abu yang terbentuk dari pembakaran sampah tersebut sebanyak  $2\%$ , *heating value* sampah rata-rata diperoleh  $4136 \text{ kJ}/\text{kg}$ , maka panas yang diperoleh dari pembakaran sampah adalah  $387.8 \text{ kW}$ , maka total suplai panas ke ruang bakar ( $Q_{in}$ ) diperoleh  $1014.2 \text{ kW}$ . Dengan panas jenis dari gas buang  $1.15 \text{ kJ}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$  dan massa gas buang  $1.078 \text{ kg}/\text{det}$ , maka temperatur gas buang dapat diperoleh dari rumus sebagai berikut:

$$T_{gas} = \frac{Q_{in} - (Q_{ps} + Q_e)}{m_g c_p} + T_{in} \quad (4)$$

diperoleh  $724 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### Ruang Bakar Kedua

Pembakaran sampah di dalam ruang bakar utama terjadi tiga proses yaitu proses evaporasi, proses

gasifikasi dan pembakaran sampah menjadi abu. Gas hidrokarbon yang terbentuk di dalam ruang bakar utama antara lain gas metan ( $\text{CH}_4$ ), gas hidrogen ( $\text{H}_2$ ) dan karbon monoksida ( $\text{CO}$ ). Estimasi komposisi gas  $\text{CH}_4$  adalah  $0.1\% \approx 3.79413 \text{ m}^3/\text{jam}$ , gas  $\text{H}_2$  adalah  $0.1\% \approx 3.79413 \text{ m}^3/\text{jam}$  dan gas  $\text{CO}$  adalah  $1\% \approx 37.9413 \text{ m}^3/\text{jam}$ . *Heating value* gas  $\text{CO}$  adalah  $11.9 \text{ MJ}/\text{m}^3$ , gas  $\text{H}_2$  adalah  $12.1 \text{ MJ}/\text{m}^3$  dan gas  $\text{CH}_4$  adalah  $90.6 \text{ MJ}/\text{m}^3$ . Gas-gas tersebut dialirkan ke dalam ruang bakar kedua dan campur lagi udara *ratio* masing-masing adalah  $9.85$  untuk *LANG*,  $9.85$  gas  $\text{CH}_4$ ,  $2.4$  untuk gas  $\text{CO}$ ,  $2.4$  untuk gas  $\text{H}_2$ , maka total kebutuhan udara pembakaran adalah  $137.6 \text{ m}^3/\text{jam}$ . Jadi jumlah gas buang terbentuk di dalam ruang bakar kedua diperoleh  $3834.66 \text{ m}^3/\text{jam} \approx 1.065 \text{ m}^3/\text{det}$ .

Panas yang diperoleh pembakaran gas  $\text{CO}$  adalah  $125.4 \text{ kW}$ , panas yang diperoleh pembakaran gas  $\text{H}_2$  adalah  $12.7 \text{ kW}$  dan panas yang diperoleh pembakaran gas  $\text{CH}_4$  adalah  $95.5 \text{ kW}$ , maka total panas yang diperoleh dari pembakaran gas  $\text{CO}$ , gas  $\text{H}_2$  dan gas  $\text{CH}_4$  diperoleh  $233.6 \text{ kW}$ . Pada ruang bakar panasnya disuplai oleh suatu *burner* yang *output* panasnya adalah  $208.8 \text{ kW}$ , maka total panas yang terbentuk di dalam ruang bakar kedua adalah  $1224.1 \text{ kW}$ . Jadi temperatur di dalam ruang bakar kedua diperoleh  $1029 \text{ } ^\circ\text{C}$ , namun temperatur dibatasi  $900 \text{ } ^\circ\text{C}$  dan historisnya  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ , maka temperatur maksimum  $920 \text{ } ^\circ\text{C}$ , pada kondisi *burner* pada ruang bakar kedua "OFF" dan pada temperatur  $880 \text{ } ^\circ\text{C}$  *burner* pada ruang bakar "ON" kembali. Jadi temperatur ruang bakar dua relatif lebih besar pada ruang bakar utama.

## PENGUKURAN GAS BUANG

Tabel 3. Kondisi Pengambilan Sampel Emisi Gas

No	Urutan Pengambilan Sampel	Hasil Pengukuran	Satuan Ukur
1	Jenis sampah	organik	-
2	Berat sampah	50	Kg
3	Suhu TIC - 1	779	$^{\circ}\text{C}$
4	Suhu TIC - 2	885	$^{\circ}\text{C}$
5	Asap	Jernih	-
6	Suhu rata-rata aliran gas	437	$^{\circ}\text{C}$
7	Tekanan statis rata-rata	761.76	mmHg
8	Konsepian aliran gas	25.8933	m/s
9	Volume	1.2	$\text{Nm}^3/\text{s}$
10	Fraksi air dalam gas	$19.4 \times 10^{-6}$	-
11	Oksigen $\text{O}_2$ di cerobong	11.35	%
12	Berat molekul aliran gas	29.3118	$\text{Kg}/\text{mol}$
13	Efisiensi pembakaran	99.97	%

Metode pengukuran temperatur pada ruang bakar utama dan ruang bakar kedua dilakukan pada beban normal dan sampah sebelum dimasukkan ke ruang bakar ditimbang terlebih dahulu, berat sampah yang dimasukkan ke ruang bakar dilakukan secara konstan  $50 \text{ kg}$  dalam selang waktu sepuluh menit, dan pengukuran waktu menggunakan *stop watch*. Untuk memantau kejadian temperatur pada masing-masing ruang bakar dipasang suatu sensor, sehingga temperatur yang terjadi di dalam ruang bakar utama

dan kedua dapat dilihat pada monitor panel kontrol dan dicatat setiap waktu sepuluh menit. Pengukuran temperatur pada masing – masing ruang bakar pada kondisi *steady state*. Pengukuran parameter ini dilakukan oleh PT.Cereslab pada pengukuran produk pembakaran sampah. Hasil pengukuran berat umpan dan temperatur disusun di dalam suatu tabel dan dapat dilihat pada Tabel 3.

#### ANALISIS DAN DISKUSI

Dilihat pada Tabel 3, Temperatur ruang bakar utama hasil analisis diperoleh 724 °C dan hasil pengukuran diperoleh 779 °C perbedaan hasil analisis dan hasil pengukuran disebabkan adanya perbedaan antara estimasi kandungan air sampah dan kandungan air sampah secara aktual, sehingga ada selisih energi panas yang terbentuk dari proses pembakaran tersebut. Hasil analisis temperatur ruang bakar kedua diperoleh 1029 °C dan temperatur hasil pengukuran diperoleh 885 °C, selisih temperatur hasil analisis dan pengukuran estimasi kandungan gas hidrokarbon ( gas CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>) tidak sesuai dengan aktualnya atau *over estimate*, selain itu pada saat pengukuran dilakukan volume sampah di dalam ruang bakar kedua berkurang, sehingga energi panas yang terbentuk relatif lebih kecil, maka terjadi penurunan temperatur ruang bakar. Jadi perbedaan antara hasil analisis dan pengukuran ada selisih antara 7 – 14 (%) dianggap masih normal.

Hasil pengukuran kecepatan gas di dalam cerobong diperoleh 25.8933 m/det, luas penampang cerobong 0.1164 m<sup>2</sup>, fraksi volume uap air di dalam gas buang 0.000104 m<sup>3</sup>, suhu absolut kondisi standar 298 °K, tekanan absolut gas buang 761.0075 mmHg, temperatur absolut rata – rata gas buang 746 °K dan tekanan absolut kondisi standar 760 mmHg, sehingga diperoleh laju gas buang hasil pengukuran 4340 mm<sup>3</sup>/jam dan gas buang hasil analisis diperoleh 3834.66 mm<sup>3</sup>/jam, maka gas buang hasil pengukuran diperoleh relatif lebih besar 11.6 % dari hasil analisis. Selisih aliran volumetrik gas buang di dalam cerobong ditentukan oleh suplai udara di dalam *burner* relatif lebih besar dari analisis, berat sampah yang ditempatkan ke dalam ruang bakar relatif besar dan suplai udara primer ke dalam ruang bakar relatif lebih besar, sehingga aliran volumetrik gas buang hasil pengukuran relatif lebih besar dari hasil analisis, namun masih batas normal.

Panas yang dibutuhkan untuk proses evaporasi dan pembakaran sampah diperoleh 232.5 kW dan panas suplai dan yang terbentuk dari pembakaran sampah diperoleh 1014.2 kW, sehingga pembakaran sampah dapat dilaksanakan dalam waktu yang singkat. Temperatur operasi pada ruang bakar 885 °C relatif lebih tinggi dari temperatur pembakaran gas karbon monoksida (gas CO) 620 °C, maka gas CO dapat dirubah menjadi gas CO<sub>2</sub> secara total di dalam ruang bakar kedua.

#### KESIMPULAN

4. Temperatur gas buang yang diperoleh dari hasil pengukuran dan hasil analisis ada selisih antara 7 – 14 (%) karena *over estimate* kadar air dan kandungan hidrokarbon yang terbentuk, namun masih dianggap normal.
5. Aliran volumetrik gas buang hasil analisis dan hasil pengukuran ada selisih 11.6 % karena estimasi dari komposisi kimia dari sampah tersebut tidak sesuai dengan aktualnya.
6. Temperatur gas buang di dalam ruang bakar relatif lebih tinggi dari temperatur gas CO, sehingga gas CO dapat dirubah menjadi gas CO<sub>2</sub> dan gas buang ke luar cerobong dapat memenuhi baku mutu lingkungan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Incropera . Frank P, (1976), *Introduction to Heat Transfer*, Third Edition, John Willey & Son, New York
- [2] Moran.Michale J,Shapiro.Howard N, (2000), *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Fourth Edition,John Willey&Son,Inc, New York
- [3] Kreith Frank,(1991), *Principles of Heat Transfer*, Second Edition,Harper & Row, Publisher, Inc,
- [4] Fox.Robart W, (1976), *Introduction to Fluid Mechanics*, Fourth Edition, John Willey & Son, Inc, New York
- [5] Frass.Arthur P,(1976), *Heat Exchanger Design*, Second Edition, John Willey & Son, New York
- [6] Bruner Calvin R, (1991) “ *Handbook of Incineration System*”, McGraw – Hill, Inc.
- [7] Holman J.P, (1981), “ *Heat Transfer*” Fith edition McGraw – Hill International Company
- [8] Nagaratnam, (1984), *Fluid Mechaotic*, Khanna Publisher Delhi – 6