

## Simulasi dan Evaluasi Insinerasi Sampah Organik Rumah Tangga pada Reaktor Unggun Tetap (*Fixed Bed*)

<sup>1,2</sup>Eko Naryono, <sup>1,3</sup>Atikah, <sup>1,4</sup>Arief Rachmansyah, <sup>1,5</sup>Soemarno

<sup>1</sup> Program Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

<sup>3</sup> Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>4</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>5</sup> Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang

### Abstrak

**Abstrak:** Tujuan makalah ini adalah untuk mempelajari pengaruh variasi kadar air sampah padat dan kelebihan udara pembakaran terhadap suhu dan komposisi gas buang pembakaran dari sampah organik rumah tangga. Karakteristik suhu dan komposisi gas pembakaran diperlukan untuk perancangan peralatan, dan menentukan sistem pengolahan gas buang. Pengaruh kedua variabel ini dipelajari dengan cara simulasi pada reaktor unggun tetap. Korelasi empiris dari kedua variabel terhadap suhu pembakaran gas buang dihitung dari neraca massa dan neraca energi. Hasil perhitungannya, selanjutnya digunakan untuk menghitung komposisi gas buang pembakaran ( $\text{tar}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) menggunakan model yang dipresentasikan oleh Neves. Berdasarkan simulasi, dapat disimpulkan bahwa kenaikan kadar air sampah dapat menurunkan suhu gas buang, sedangkan variasi kelebihan udara pembakaran pada rentang 20-100% tidak berpengaruh terhadap suhu gas buang. Variasi kadar air sampah dan kelebihan udara pembakaran pada rentang yang dievaluasi, tidak banyak berpengaruh terhadap komposisi gas buang hasil pembakaran.

**Kata kunci:** Insinerasi, Neves, Reaktor unggun tetap, Sampah padat, Tar

### Abstract

**Abstract:** The aims of this paper are to study the effect of variations of moisture content of the solid waste and air excess of combustion, to the temperature and composition of the exhaust gases from the combustion of household organic waste. Temperature characteristics and compositions of the combustion gas required for the design of equipment, and determining the exhaust gas treatment system. The influence of these two variables studied, by simulating the combustion process on fixed bed updraft reactor. The empirical correlation of these two variables to the combustion temperature of the exhaust gas was calculated from the mass balance and energi balance of the combustion process. The temperature calculation results, was then used to calculate the composition of the combustion exhaust gas ( $\text{tar}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) using the model presented by Neves. Based on the simulation, it can be concluded that the increase in the water content of waste can lower the temperature of the exhaust gases, while the variation of the combustion excess air in the range of 20-100% has no effect on the temperature of the exhaust gas. The variation of water content of solid waste and excess combustion air in the range evaluated, does not affect the composition of the exhaust gases of combustion.

**Keyword:** Fixed bed, Incineration, Neves, Solid Waste, Tar

### 1. PERDAHULUAN

Volume sampah kota Malang (MSW) setiap hari mencapai 1100 m<sup>3</sup>, dengan komponen terbesar adalah sampah organik rumah tangga yang mencapai 77%. Persentase komposisi komponen sampah sebagai berikut: sampah dapur dan kebun 76,37%, plastik 14,35%, tekstil 3,79%, kayu dan bambu. 2%, gelas 0,64%, logam dan komponen lain 0,42% [1]. Pengolahan sampah selama ini dilakukan dengan cara ditimbun (*landfill*), sebagian kecil (3%) dimanfaatkan sebagai kompos atau didaur ulang dan diolah menjadi gas metana. Namun demikian sisa volume sampah padat yang belum dimanfaatkan masih sangat besar. Pada jangka panjang sisa sampah ini akan menjadi

permasalahan terutama ketersediaan lahan pembuangan yang semakin terbatas.

Salah satu alternatif metode pengolahan yang dapat diterapkan adalah sistem termal. Sistem ini menguntungkan karena dapat mengurangi volume sampah dalam jumlah yang besar dengan waktu yang singkat [2]. Pemilihan teknologi proses termal yang tepat dapat menurunkan potensi pencemaran yang ditimbulkan gas buang dan bahan padat sisa pembakaran. Teknologi pengolahan termal secara garis besar dikelompokkan menjadi menjadi dua: pembakaran konvensional dan pengolahan termal lanjut (*advanced thermal treatment*) [3]. Pembakaran konvensional meliputi insinerasi unggun tetap dan insinerasi fluidisasi sedangkan pengolahan termal lanjut terdiri dari gasifikasi, pirolisa. Pengolahan termal lanjut melibatkan teknologi yang kompleks dan belum banyak diterapkan pada skala komersial sehingga

---

Alamat Korespondensi Penulis:

Eko Naryono

Email : eko\_naryono@yahoo.com.

Alamat : Jl. Bantaran Barat I/30, Malang

sampai saat ini masih banyak digunakan pembakaran konvensional untuk pengolahan termal [3].

Beberapa definisi digunakan untuk membedakan kedua jenis pengolahan termal di atas sebagai berikut: insinerasi adalah proses pembakaran yang merupakan proses oksidasi bahan bakar (biomassa) menggunakan udara berlebih pada reaktor, pirolisa adalah proses dekomposisi biomassa menggunakan panas pada suhu tinggi (lebih tinggi dari 200 °C tanpa adanya udara dengan produk akhir arang, bio oil dan gas [4], sedangkan gasifikasi adalah proses reaksi bahan bakar padat dengan gas CO, H<sub>2</sub>O atau O<sub>2</sub> (pada jumlah terbatas) menghasilkan gas CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub> pada suhu tinggi [5]. Penerapan jenis teknologi pengolahan termal di atas tergantung dari karakteristik sampah dan produk yang diharapkan.

Beberapa peneliti terdahulu telah meneliti proses pirolisa sampah padat kota untuk memperoleh gas sintesis CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub> dengan nilai kalor LHV 13.87MJ/m<sup>3</sup> [6] ; peneliti yang lain meneliti proses pirolisa limbah pertanian untuk karakterisasi produk pirolisa yang salah satunya adalah arang [7]. Berdasarkan penelitian ini diperoleh arang pada prosentase bervariasi antara 20 – 23% tergantung jenis limbah dengan HHV 4600 – 6000 kcal/kg.

Informasi karakteristik sampah, karakteristik pembakaran dan produk pembakaran bermanfaat sebagai dasar pemilihan teknologi pengolahan termal dan pengolahan produk pengolahan termal yang sesuai sehingga pada penerapannya aman terhadap lingkungan.

Permasalahan yang dihadapi pada pengolahan termal sampah organik rumah tangga, adalah tingginya kadar air, yang dapat mencapai 70% massa [8]. Kadar air sampah yang tinggi ini dapat menyebabkan turunnya suhu nyala pembakaran [9]. Permasalahan yang lain adalah perlakuan awal untuk mengeringkan sampah sebelum dibakar, apabila menggunakan energi dari luar membutuhkan biaya yang besar karena entalpi penguapan air relatif tinggi [10].

Kinerja sistem pengolahan termal (kecepatan pembakaran, suhu dan komposisi gas buang) dipengaruhi oleh beberapa parameter [11] yaitu: rasio kadar oksigen dalam sumber oksidan terhadap kebutuhan oksigen stokiometris, waktu tinggal gas dan sampah dalam reaktor, komposisi dan sifat fisik sampah yaitu komposisi elemental, LHV, kadar abu, kadar air, kadar bahan menguap, kadar komponen lain (Cl, N, S, logam alkali, Beberapa sifat tersebut sangat penting untuk dikontrol karena mempunyai pengaruh yang dominan terhadap kinerja sistem pengolahan termal [11]. Dari beberapa sifat tersebut, kadar air merupakan sifat fisik utama yang harus dikontrol agar kinerja sistem pengolahan termal berjalan dengan baik.

Kebutuhan energi untuk penguapan air dapat diambil dari sebagian panas yang dihasilkan proses pembakaran. Proses pembakaran dan pengeringan dapat dilakukan secara bersamaan dalam satu peralatan atau pada peralatan yang terpisah.

Salah satu sistem pembakaran yang menggunakan konsep pengeringan dan pembakaran dalam satu peralatan adalah reaktor unggun tetap dengan aliran gas mengalir ke atas (*Updraft flow*).

Pada reaktor pembakaran unggun tetap, tumpukan sampah yang dibakar mempunyai beberapa zone mulai bagian bawah adalah zone pembakaran, zone gasifikasi, zone pirolisa dan zone pengeringan pada bagian paling atas. Sebagian gas hasil pembakaran mengalami reaksi gasifikasi dengan bantuan panas eksotermis hasil pembakaran. Selanjutnya gas panas ini mengalir ke atas melewati zone pirolisa dimana pada zone ini terjadi proses penguapan bahan menguap sampah kering yang berasal dari zone pengeringan. Pada tahap akhir gas panas dan bahan menguap mengalir ke zone pengeringan sehingga sampah mengalami dehidrasi sebelum dibuang ke keluar. Sampah kering hasil dehidrasi turun ke zone pirolisa baik secara gravitasi atau dengan bantuan mekanis. Produk dari zone pirolisa berupa arang mengalir ke zone pembakaran.

Komposisi dan hasil produk padat, cair dan gas tergantung dari suhu proses, yang fluktuasinya dominan dipengaruhi oleh kadar air sampah. Pengaturan suhu proses termal dapat dilakukan berdasarkan kadar panas sampah itu sendiri atau dengan cara menambahkan bahan bakar dari luar [11,12]. Penambahan bahan bakar dari luar diperlukan untuk mengkondisikan proses gasifikasi pada suhu tinggi bagi umpan dengan nilai panas (HHV) rendah. Namun demikian berdasarkan neraca energi keseluruhan, penambahan bahan bakar dari luar menghasilkan energi luaran lebih rendah [13]. Berdasarkan argumentasi tersebut di atas proses gasifikasi tidak sesuai untuk pengolahan termal sampah organik rumah tangga karena mempunyai HHV yang rendah yaitu sekitar 3800 Kcal/kg. Teknologi yang sesuai untuk pengolahan sampah organik rumah tangga adalah sistem insinerasi karena tidak diperlukan penambahan energi dari luar seperti pada gasifikasi sehingga tidak menambah biaya operasi.

Sistem insinerasi yang dipilih adalah reaktor unggun tetap dengan mengatur aliran gas ke atas karena lebih sesuai untuk sampah yang mempunyai kadar air tinggi. Simulasi ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik pembakaran pada reaktor unggun tetap aliran gas buang ke atas. Karakteristik yang dipelajari adalah profil suhu dan komposisi gas buang pada berbagai variasi kadar air sampah dan fraksi berlebih udara pembakaran. Profil suhu dihitung dari neraca massa dan energi, komposisi gas buang dihitung menggunakan model empiris [14]. Hasil simulasi ini akan digunakan sebagai dasar untuk merancang reaktor pembakaran sampah organik rumah tangga kota Malang.

## 2. KARAKTRISTIK SAMPAH KOTA MALANG

Sampai saat ini publikasi karakteristik sampah kota Malang terbatas pada jenis komponen penyusun sampah, sedangkan data komposisi kimia sampah sangat terbatas. Karakteristik sampah

berdasarkan jenis komponen penyusun tidak dapat digunakan untuk perhitungan suhu dan komposisi pada simulasi. Perhitungan suhu dan komposisi gas buang pembakaran membutuhkan data komposisi kimia C, H, O.

Komposisi kimia C, H, O sampah dapat dilakukan dengan analisa ultimat atau dihitung dari hasil analisa proksimat. Cara pertama membutuhkan peralatan khusus yang lebih kompleks dibandingkan dengan cara kedua [15]. Namun demikian cara kedua memerlukan korelasi empiris perhitungan komposisi kimia C, H dan O terhadap hasil analisa proksimat yaitu kadar karbon tetap, bahan menguap dan abu. Salah satu korelasi yang dapat digunakan untuk perhitungan komposisi kimia dari hasil analisa proksimat ditunjukkan persamaan 1, 2, 3 dan 4 berikut [15] :

$$C = 0,635 FC + 0,460 VM + 0,095 ASH \quad (1)$$

$$H = 0,059 FC + 0,060 VM + 0,010 ASH \quad (2)$$

$$O = 0,340 FC + 0,469 VM - 0,023 ASH \quad (3)$$

dimana : FC - karbon tetap (%)

VM-bahan menguap (%)

ASH-Kadar abu (%)

$$HHV = 81,86 C + 304,2 H - 35,8 O \quad \text{kCal/kg} \quad (4)$$

### 3. REAKTOR UNGGUN TETAP DENGAN ALIRAN GAS KE ATAS

Prinsip kerja insinerator unggun aliran gas buang ke atas telah banyak dijelaskan dari beberapa referensi [17-19], dengan sekema proses seperti ditunjukkan gambar1. Secara umum reaktor pembakaran unggun tetap dapat dibagi menjadi empat zone proses termal: zone pengeringan, zone pirolisa, zone gasifikasi dan zone pembakaran. Berdasarkan gambar 1, prinsip kerja proses insinerator dapat dijelaskan sebagai berikut : umpan sampah dimasukkan dari bagian atas ke dalam zone pengeringan, pada zone ini terjadi proses pengeringan menggunakan aliran gas panas dari zone pirolisa. Sampah yang kering selanjutnya mengalami pirolisa pada zone pirolisa.

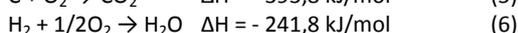
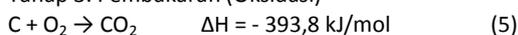
Produk padat dari zone pirolisa mengalami proses gasifikasi bereaksi dengan gas panas dari zone pembakaran. Pada zone pembakaran, produk padat proses gasifikasi mengalami reaksi oksidasi dengan oksigen yang dialirkan dari dasar insinerator. Produk padat dari zone pembakaran berupa abu dikeluarkan dari dasar reaktor, sedangkan produk gas hasil pembakaran dialirkan ke atas melewati zone gasifikasi, zone pirolisa, dan zone pengeringan sebelum dikeluarkan ke atmosfer.

Tahapan proses dan reaksi pada masing masing zonesebagai berikut [13]:

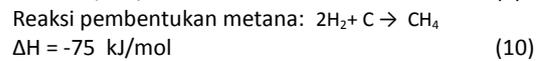
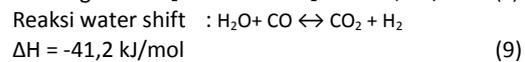
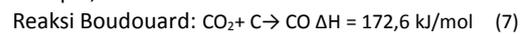
Tahap 1. Pengeringan : terjadi pengeringan air dari sampah menghasilkan uap air

Tahap 2. Pirolisa : terjadi proses penguapan bahan yang mudah menguap dari sampah kering dari zone pengeringan menghasilkan arang

Tahap 3. Pembakaran (Oksidasi)



Tahap 4, Reaksi reduksi



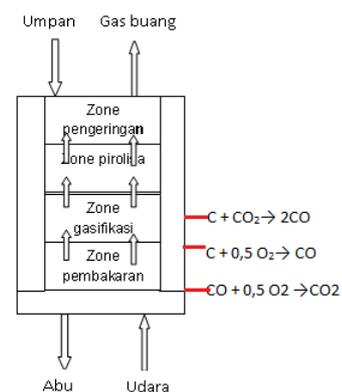
Distribusi produk reaktor unggun tetap pada masing masing zone berbeda. Pada zone pengeringan produknya adalah air, zone pirolisa CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan tar, zone gasifikasi CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> dan zone oksidasi (pembakaran) adalah CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O, dan N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> sisa. Pada insinerasi sampah padat jenis organik dengan kandungan nilai panas rendah, panas oksidasi (persamaan 5,6) tidak mencukupi untuk proses gasifikasi (persamaan 7, 8, 9, 10) [13]. Panas reaksi oksidasi dari pembakaran sampah hanya cukup untuk pengeringan dan pirolisa. Dengan demikian produk gas hasil gasifikasi CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> prosentasenya sangat rendah, sehingga proses pada zone gasifikasi dianggap tidak dapat berlangsung.

Jumlah massa air produk zone pengeringan dapat dihitung berdasarkan kandungan air dari sampah. Pada zone pembakaran jumlah produk CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> sisa dapat dihitung berdasarkan persamaan neraca massa pembakaran sebagai berikut [12]:

$$\begin{aligned} n_{CO_2} &= n_C, \quad n_{air} = (n_H - n_{Cl})/2 + n_{air}, \quad n_{HCl} = n_{Cl}, \quad n_{SO_2} = n_S, \\ n_{Oksigen} &= n_O/2 + n_{O_2} - n_C - n_S - (n_H - n_{Cl})/4, \\ n_{nitrogen} &= n_N/2 + n_{N_2} \end{aligned} \quad (11)$$

Dimana n<sub>C</sub>, n<sub>H</sub>, n<sub>Cl</sub>, n<sub>S</sub> dan n<sub>O</sub> adalah jumlah mol C, H, Cl, S dan O dari perhitungan komposisi elemental sampah. Kebutuhan udara pembakaran dihitung berdasarkan perhitungan oksigen stokiometris persamaan (12).

$$n_{O_2} = n_C + (n_H - n_{Cl})/4 + n_S - n_O/2 \quad (12)$$



Gambar 1. Skema kerja insinerator

Jumlah dan distribusi produk zone pirolisa dapat dihitung dari persamaan model Neves seperti ditunjukkan persamaan (13) berikut [14]:

$$\begin{bmatrix} Y_{C,w} & Y_{C,c,h} & Y_{C,oh} & Y_{C,co} & Y_{CO_2} & 0 & 0 \\ Y_{O,w} & 0 & 0 & Y_{O,co} & Y_{O,CO_2} & Y_{O,H_2} & 0 \\ Y_{H,w} & Y_{H,c,h} & Y_{H,oh} & 0 & 0 & Y_{H,H_2O} & Y_{H,H_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\Omega_1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0,146 & 0 & 0 & 0 \\ LHV_G & LHV_{C,H} & LHV_{OH} & LHV_{CO} & 0 & LHV_G & LHV_{H_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{w,F} \\ Y_{c,h,F} \\ Y_{c,h,F} \\ Y_{c,h,F} \\ Y_{c,h,F} \\ Y_{c,h,F} \\ Y_{H_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{c,F} - Y_{CO} \cdot Y_{c,F} \\ V_{O,F} - V_{CO} \cdot Y_{c,F} \\ Y_{H,F} - Y_{H_2O} \cdot Y_{c,h,F} \\ 0 \\ 2,18 \times 10^{-4} \\ \left( \sum_j Y_{j,F} - Y_{c,h,F} \cdot \sum_j Y_{j,oh} \right) LHV_G \\ \Omega_2 \end{bmatrix}$$

(13)

$$\Omega_3 = \left( \sum_j Y_{j,F} - Y_{c,h,F} \cdot \sum_j Y_{j,oh} \right) \cdot LHV_G \tag{14}$$

Dimana : j = C, H, O

$$\Omega_1 = Y_{H_2,F} / Y_{CO,F}$$

$$\Omega_2 = Y_{H_2}$$

F = Umpan

Dengan mengacu persamaan matriks (13), komposisi gas buang CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan tar (matriks kedua) dapat dihitung dari penyelesaian persamaan matriks ini. Untuk menyelesaikan matriks ini diperlukan data untuk matriks satu dan matriks tiga, yang harganya tergantung dari suhu gas buang dan komposisi kimia C, H, O sampah [14].

Suhu gas buang dapat diketahui dari pengukuran atau diprediksi berdasarkan perhitungan. Prediksi suhu gas buang pembakaran dapat dihitung menggunakan persamaan (15) dan (16) sebagai berikut [12]:

$$Q = (-HHV)_{total} + (H_{sensibel})_{keluar} - (H_{sensibel})_{masuk} \tag{15}$$

$$Q = -\sum (HHV)_i + \sum \{n C_{pm} (T - T_{in})\}_j + n_{air} (\Delta H_v)_{air} + \sum \{n (C_{pm} (T - T_{in}))\}_l \tag{16}$$

Dimana : HHV = *High Heating Value*, n = mol, C<sub>pm</sub> = kapasitas panas molar, T = suhu gas buang pembakaran, T<sub>in</sub> = suhu umpan masuk, ΔH<sub>v</sub> = panas laten penguapan, n<sub>air</sub> = mol air, l = bahan bakar, udara, j = CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCl, SO<sub>2</sub>.

**4. METODOLOGI SIMULASI**

Simulasi ini menggunakan karakteristik sampah yang berasal data primer hasil analisa bahan sampah fraksi organik yang diambil dari tempat pengolahan sementara terpadu (TPST) Tlogomas, kota Malang. Dengan demikian hasil simulasi ini dapat digunakan untuk dasar merancang sistem insinerasi yang sesuai untuk kota Malang.

**4.1. Bahan Sampah**

Bahan sampah yang digunakan untuk simulasi sebanyak empat jenis sampel yang diambil dari TPST Tlogomas, pada tumpukan penimbunan yang berbeda dengan asumsi mewakili karakteristik sampah kota Malang. Keempat sampel ini selanjutnya dianalisa kadar karbon tetap, bahan menguap dan kadar abu dengan metode gravimetri di laboratorium analisa Politeknik Negeri Malang. Hasil analisa proksimat sampel sampah tertera pada Tabel 1.

Hasil analisa proksimat ini kemudian digunakan untuk menghitung komposisi elemental C, H dan O menggunakan persamaan 1, 2 dan 3. Nilai panas (HHV) sampah dihitung dengan persamaan empiris 4

[16], berdasarkan komposisi elemental C, H dan O hasil dari perhitungan tersebut. Hasil perhitungan komposisi kimia dan HHV sampah tertera pada tabel 2.

**Tabel 1.** Hasil analisa proksimat (basis kering) sampah di TPST Tlogomas

no	Kadar air (%)	Kadar abu (%)	Bahan menguap (%)	Karbon tetap (%)
1	53.7	16	64.53	19.47
2	49.4	20.4	59.42	20.18
3	47.95	18.25	63.22	18.53
4	55.6	15.2	62.8	22

**Tabel 2.** Hasil perhitungan komposisi kimia dan HHV sampah di TPST Tlogomas

Sampel (no)	C (%)	H (%)	O (%)	HHV kCal/kg
1	43.57	5.18	36.53	3831.8
2	42.09	4.96	34.28	3724.2
3	42.58	5.07	35.55	3752.6
4	44.30	5.22	36.60	3900.9
<b>Rata rata</b>	<b>43.13</b>	<b>5.11</b>	<b>35.74</b>	<b>3802.4</b>

Sumber: perhitungan

**4.2. Teknik Simulasi dan Pendekatan Model**

Skema proses pembakaran pada reaktor unggun tetap yang disimulasikan ditunjukkan Gambar 1. Beberapa asumsi yang digunakan pada simulasi ini yaitu : bahan sampah tidak mengandung sulfur dan klor, proses yang terjadi adalah pengeringan, pirolisa dan oksidasi, udara pembakaran diasumsikan terdiri dari 21 % O<sub>2</sub> dan 79 % N<sub>2</sub>, gasifikasi diasumsikan tidak dapat berlangsung karena kebutuhan panas tidak mencukupi, umpan zone pembakaran berupa arang dari zone pirolisa, panas gas buang hasil pembakaran mengalir ke atas digunakan untuk mengeringkan sampah pada zone pengeringan dan proses pirolisa pada zone pirolisa, tidak ada panas yang hilang ke lingkungan maka suhu gas buang pembakaran diasumsikan sama dengan suhu pirolisa.

Simulasi diawali dengan menghitung suhu dan komposisi gas buang zone pembakaran menggunakan persamaan neraca massa (pers.11) dan neraca energi (pers. 15, 16) secara simultan pada berbagai variasi kadar air sampah dan fraksi kelebihan udara pembakaran. Kadar air sampah yang divariasikan adalah 0,2., 0,3., 0,4., 0,5., dan 0,6, sedangkan fraksi kelebihan udara 0,2., 0,4., 0,6., 0,8., dan 1. Perhitungan suhu gas buang pembakaran dilakukan dengan cara menduga T pada persamaan 16 sampai diperoleh harga T yang konvergen, yaitu pada saat diperoleh Q = 0 (pers. 15), yang mempunyai pengertian bahwa semua panas masuk digunakan untuk menguapkan air dan memanaskan aliran gas hasil di dalam reaktor.

Suhu hasil perhitungan pada berbagai variasi kadar air sampah dan fraksi berlebih udara pembakaran ini selanjutnya digambarkan dalam bentuk kurva yaitu : kadar air vs T (Gambar 2) dan fraksi udara berlebih vs T (Gambar 4). Selain itu hasil perhitungan suhu tersebut juga digunakan untuk

menghitung produk pirolisa yaitu : tar ( $Y_{tar,F}$ ),  $C_xH_y$  ( $Y_{C_xH_y,F}$ ),  $CH_4$  ( $Y_{CH_4,F}$ ),  $CO$  ( $Y_{CO,F}$ ),  $CO_2$  ( $Y_{CO_2,F}$ ),  $H_2O$  ( $Y_{H_2O,F}$ ), dan  $H_2$  ( $Y_{H_2,F}$ ).

Distribusi gas produk reaktor yang disimulasikan terdiri dari  $CO$ ,  $CO_2$  (dari zone pembakaran dan pirolisa),  $C_xH_y$ ,  $N_2$  ( dari zone pembakaran),  $O_2$  (dari zone pembakaran),  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$  (dari zone pembakaran dan pengeringan) dan Tar. Distribusi produk insinerasi ini selanjutnya digambarkan dalam bentuk kurva kadar air vs komposisi ( Gambar 3), fraksi udara berlebih vs komposisi (Gambar 5) dan T vs komposisi (Gambar 6).

**5. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN**

Tujuan simulasi ini adalah mengetahui pengaruh variabel operasi, fraksi udara berlebih dan kadar air sampah terhadap suhu dan komposisi gas buang insinerasi pada reaktor unggun tetap. Panas gas buang berasal dari reaksi oksidasi arang hasil pirolisa sampah pada zone pembakaran.

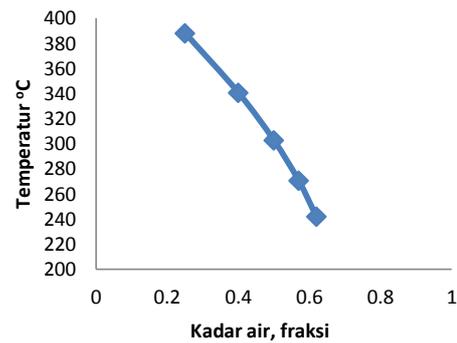
**5.1 Pengaruh Kadar Air terhadap Komposisi Gas Buang**

Profil suhu gas buang pada berbagai variasi kadar air ditunjukkan pada Gambar 2. Semakin tinggi kadar air sampah, suhu gas buang semakin rendah. Hal ini disebabkan karena sebagian besar panas pembakaran sampah digunakan untuk menguapkan air, sehingga panas untuk memanaskan gas buang hasil pembakaran sampah kecil.

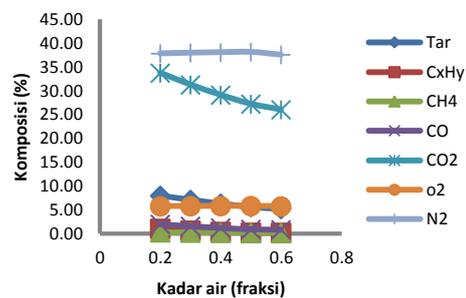
Fluktuasi komposisi gas buang bervariasi yang sebagian besar kontribusinya berasal dari zone pirolisa. Komposisi gas buang dipengaruhi oleh suhu gas buang yang dianggap sebagai suhu pirolisa. Proses pirolisa menghasilkan berbagai jenis komponen senyawa antara lain  $CO$ ,  $CO_2$ , Tar,  $CH_4$ , dan  $C_xH_y$ . Pada Gambar 3 ditunjukkan komposisi komponen masing gas pada berbagai variasi kandungan air. Berdasarkan Gambar 3 ditunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air sampah, maka prosentase komposisi gas buang cenderung turun. Hal ini disebabkan karena semakin rendah suhu sebagian besar konversi sampah pada zone pirolisa menjadi arang sehingga konversi sampah menjadi gas rendah. Komponen gas yang terbesar adalah  $CO_2$  karena pada suhu dibawah  $600^{\circ}C$  reaksi karbon dan oksigen lebih mudah membentuk  $CO_2$  [11].

**5.2 Pengaruh udara berlebih terhadap Komposisi gas Buang**

Pengertian fraksi udara berlebih pembakaran pada simulasi ini adalah fraksi kelebihan udara yang digunakan untuk pembakaran terhadap kebutuhan udara stokiometrisnya. Secara teoritis variasi fraksi udara berlebih berpengaruh terhadap suhu pembakaran. Fraksi udara berlebih yang dipelajari pada rentang 0.2 – 1 (20 – 100 %). Guna mengetahui pengaruh suhu terhadap komposisi gas buang, terlebih dahulu dipelajari pengaruh udara berlebih terhadap suhu pembakaran dan pirolisa.

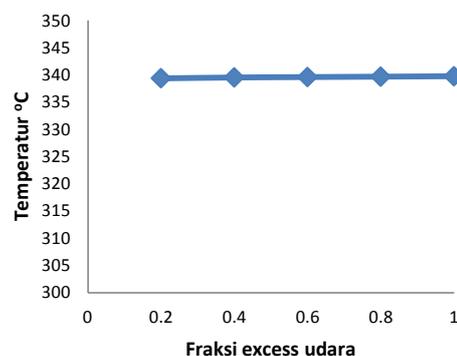


**Gambar 2.** Profil suhu gas buang pembakaran pada berbagai variasi kadar air



**Gambar 3.** Komposisi komponen gas buang pada berbagai variasi kadar air

Pengaruh fraksi udara berlebih terhadap suhu pembakaran dan pirolisa sampah dengan kadar air 55% dapat dilihat pada Gambar 4.



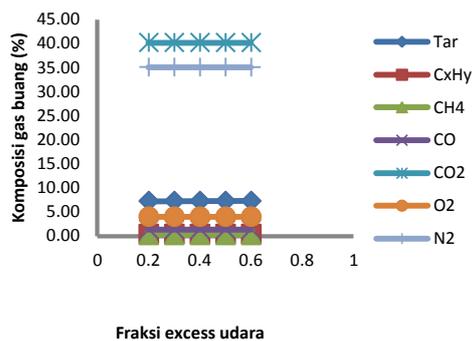
**Gambar 4.** Pengaruh udara berlebih terhadap suhu gas buang

Berdasarkan Gambar 4, suhu pirolisa tidak dipengaruhi oleh perubahan udara berlebih sehingga cenderung konstan. Kelebihan udara berpengaruh terhadap suhu adiabatik pembakaran, semakin besar kelebihan udara maka suhu adiabatik pembakaran semakin turun, namun demikian tidak menurunkan total panas yang dipindahkan dari zone pembakaran ke tumpukan sampah pada zone pirolisa dan pengeringan. Dengan demikian suhu zone pirolisa cenderung konstan.

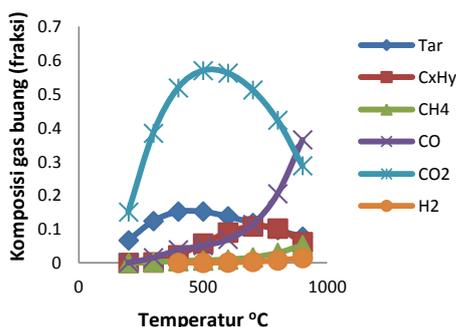
Pengaruh kelebihan udara terhadap komposisi gas buang dapat dilihat pada Gambar 5. Komposisi gas buang cenderung tetap tidak dipengaruhi udara berlebih karena suhu gas yang melewati zone pirolisa tetap.

**5.3. Pengaruh suhu terhadap Komposisi gas Buang**

Pada Gambar 6 ditunjukkan profil komposisi gas buang pada rentang suhu 200 – 1000°C. Semakin tinggi suhu, komposisi gas reaksi reduksi (CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub>) pada zone gasifikasi semakin tinggi. Pada suhu yang tinggi apabila terdapat kelebihan karbon, maka karbon dioksida bereaksi dengan karbon menghasilkan karbon monoksida. Demikian juga oksigen lebih mudah bereaksi dengan karbon menghasilkan CO dibandingkan dengan H<sub>2</sub> untuk membentuk air, sehingga konsentrasi CO dan H<sub>2</sub> semakin tinggi [11]. Dengan semakin tingginya hidrogen memicu terjadinya reaksi dengan karbon menghasilkan metana (CH<sub>4</sub>). Tar dan hidrokarbon terdekomposisi pada suhu di atas 600°C sehingga menyebabkan komposisinya menurun setelah suhu diatas 600 °C.



**Gambar 5.** Pengaruh udara berlebih terhadap komposisi gas buang



**Gambar 6.** Komposisi gas buang pada berbagai suhu

**6. DISKUSI**

Jenis dan komposisi gas buang pembakaran sampah organik rumah tangga dapat dikontrol dengan cara mengkondisikan umpan, mengatur kondisi operasi pembakaran dan pemilihan sistem peralatan pembakaran. Pengkondisian kadar air sampah dapat

menaikkan suhu pembakaran, pengaturan kondisi operasi pembakaran dapat digunakan untuk mengontrol jenis dan komposisi gas buang, sedangkan pemilihan sistem peralatan pembakaran untuk memudahkan pengkondisian umpan dan pengaturan kondisi operasi proses pembakaran.

Salah satu jenis peralatan yang sesuai untuk pembakaran sampah organik rumah tangga adalah reaktor unggun tetap dengan aliran gas buang ke atas. Sistem ini sesuai digunakan untuk pengolahan termal sampah organik rumah tangga yang mempunyai karakteristik kadar air tinggi. Sampah dengan kadar air tinggi, yang diunggunkan di dalam reaktor dapat diturunkan kadar airnya menggunakan gas panas hasil pembakaran arang dari zone pirolisa.

Suhu gas buang pembakaran sampah organik dari TPST Tlogomas relatif rendah berkisar 320°C, sehingga berpotensi menghasilkan tar dengan fraksi massa sekitar 0.2 pada gas buang. Potensi polutan ini dapat diturunkan konsentrasinya dengan cara menaikkan suhu pembakaran sampai di atas 600°C sehingga konsentrasi tar dan hidrokarbon turun karena terdekomposisi. Pada suhu di atas 600°C komposisi gas buang terdiri dari sebagian besar CO, dan sebagian kecil H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>, yang dapat dibakar ulang karena masih mengandung nilai kalor yang relatif tinggi sebelum dibuang ke lingkungan. Hasil pembakaran CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> adalah CO<sub>2</sub> dan air yang aman terhadap lingkungan.

Untuk mencapai suhu gas buang 600 °C pada pembakaran sampah organik rumah tangga diperlukan tambahan bahan bakar dari luar karena nilai panas (LHV) sampah organik relatif rendah yaitu sebesar 3800 kcal/kg. Penambahan bahan bakar dari luar membutuhkan biaya operasional tambahan. Pembakaran sampah secara langsung tanpa menambahkan bahan bakar dari luar yang hanya menggunakan panas pembakaran sampah itu sendiri menghasilkan suhu gas buang rendah. Hal ini berdampak terhadap jenis dan komponen gas buang yang dihasilkan dan berpotensi menghasilkan polutan yang mencemari lingkungan.

Beberapa jenis polutan pada tipe sistem pembakaran dengan temperature rendah adalah hidrokarbon dan tar dengan konsentrasi tinggi. Penerapan sistem pembakaran ini walaupun tidak memerlukan tambahan biaya bahan bakar dari luar namun dibutuhkan biaya investasi peralatan yang lebih tinggi daripada sistem pembakaran suhu tinggi, karena untuk biaya sistem pengolahan gas buang yang lebih kompleks.

Variasi fraksi kadar air sampah organik rumah tangga tidak banyak berpengaruh terhadap komposisi CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub> pada gas buang yang konsentrasi kecil, dibawah 1%. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan sampah organik rumah tangga pada gasifikasi efisiensinya rendah. Penurunan kadar air sampah umpan gasifikasi tidak dapat menaikkan konsentrasi CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub>. Demikian juga kontrol kelebihan udara juga tidak dapat meningkatkan komposisi gas CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub>. Pemanfaatan

pengolahan sampah organik rumah tangga dengan cara dibakar untuk menghasilkan panas, lebih sesuai dibandingkan dengan sistem gasifikasi untuk menghasilkan gas yang mempunyai nilai panas (LHV). Permasalahan yang dihadapi pada pengolahan sampah organik rumah tangga dengan cara insinerasi adalah perlakuan gas yang memerlukan sistem pengolahan yang spesifik dan kompleks.

#### KESIMPULAN

Pada paper ini telah dilakukan simulasi dan evaluasi insinerasi sampah organik rumah tangga menggunakan reaktor unggun tetap. Simulasi dan evaluasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh kadar air dan udara berlebih terhadap profil suhu dan komposisi gas buang. Berdasarkan simulasi dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Secara teoritis pembakaran sampah padat organik pada reaktor unggun tetap akan menghasilkan suhu gas buang yang stabil, walaupun umpan mengandung air yang berfluktuasi.
2. Kadar air sampah berpengaruh terhadap suhu gas buang, semakin tinggi kadar air semakin rendah suhu gas buang, demikian juga suhu pirolisa. Kadar air semakin tinggi menyebabkan konsentrasi gas semakin menurun, dengan gas CO<sub>2</sub> merupakan komponen yang komposisinya paling besar.
3. Pengaturan kelebihan udara pada rentang fraksi 0.2 – 1, tidak berpengaruh terhadap suhu dan komposisi gas buang
4. Variasi kadar air sampah dan udara berlebih tidak berpengaruh terhadap konsentrasi gas CO, CH<sub>4</sub> dan H<sub>2</sub> yang merupakan produk gas yang diinginkan pada gasifikasi.
5. Pemanfaatan sampah organik rumah tangga untuk energi lebih sesuai menggunakan sistem insinerasi untuk menghasilkan gas panas, dibandingkan dengan sistem gasifikasi untuk menghasilkan gas yang mempunyai nilai panas (LHV).

#### SARAN

Hasil simulasi ini dapat digunakan untuk merancang insinerator yaitu menentukan ukurannya. Dengan mengetahui distribusi gas buang dan kandungan abu sampah, maka dapat dihitung neraca massa sesuai dengan kapasitas. Namun demikian disarankan untuk membuat prototipe pada skala kecil terlebih dahulu, sebelum melakukan rancangan atau rancang bangun pada skala besar. Dengan demikian dapat dilakukan pengujian kinerja dan validasi hasil simulasi menggunakan prototipe tersebut.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai dari dana BPP-DN Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI), Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BPS kota Malang (*Statistics of Malang City*), 2011. Malang Dalam Angka (*Malang City inFigure*)

- [2]. Solid waste combustion and incineration, [http://www.epa.gov/eapower/non-hw/muncpl/landfill/sw\\_combst.htm](http://www.epa.gov/eapower/non-hw/muncpl/landfill/sw_combst.htm)
- [3]. Startec, 2011. Technical review of municipal solid waste thermal treatment practices
- [4]. Energi Information Administration (EIA), 2004. Evaluation of conversion Technology Process and Product. University of California
- [5]. USDOE Energi efficiency and renewable energi glossary, 2004. Evaluation of conversion Technology Process and Product. University of California
- [6]. Maoyun He, Bo Xiao, Shimming Liu, Zhiquan Hu, Xanjun Guo, Siyi Luo, Fan Yang 2010. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalysts. *J.Anal. Appl. Pyrolysis* . 87: 181-187.
- [7]. Yanik Y., Kommayer C., Saglam M., Yuksel M., 2010. Fast pyrolysis of agricultural waste: Characterization of pyrolysis. *Fuel Processing Technolony* . 88: 942-947.
- [8]. J. Van Caneghem, A. Bream, P. Lievens, C. Block, P. Billen, I. Vermeulen, R. Dewil, J. Baeyens, C. Vandecasteele, 2012. Fluidized bed of waste insinerator. *Progress in Energi and Combustion Science* : **Article in Press**
- [9]. Y.B. Yang., V.N. Sharifi., J. Swithenbank, 2004. Effect of air flow rate and fuel air on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds. *Fuel* . **83**: 1553-1562.
- [10]. Caton P.A., Car M.A., Kim, S.S., Beautyman M.J., 2010. Energi recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration. *Energi Conversion and Management* . 51: 1157-1169.
- [11]. Arena U., 2012. Fast pyrolysis of agricultural waste: A technological aspects of municipal solid waste gasification. A review *Waste Management*. 32: 625-639.
- [12]. Lee, C.C., Lin, S.D., 2007. Handbook of environmental engineering calculations. second edition. **39**, Mc. Graw- Hill Companies.
- [13]. Tung Wu K., Ti Lee H., 2007 Bio-hydrogen via thermochemical processes. *J. Environ. Eng. Manage*. 17 (4): 307-310.
- [14]. Neves D., Thunman H ., Matos A., Tarelho L., Barea A.G., 2011. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energi and Combustion Science*. **37**: 611- 630.
- [15]. Jianfeng Shen, Shuguang Zhu \*, Xinzhi Liu, Houlei Zhang, Junjie Tan, 2010. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. *Energi Conversion and Management*. 51 : 983–987
- [16]. Komilis D., Evangelou A., Giannakis G., Lymperis C., 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management* . **32** : 372–381

- [17]. Liu, Y.A., Liu, Y.U., 2005. "Novel incineration technology integrated with pengeringan, pyrolysis, gasification, and combustion of MSW and ashes vitrification. *Environmental Science Technology*. **39**: 3855- 3863.
- [18]. Antonopoulos IS., Karagiannidis A., Elefsiniotis L., Perkoulidis G., Gkouletsos A., 2011. Development of an innovative 3-stage-bed gasifier for municipal sold waste and biomass. *Fuel Processing Technology*. **92**: 2389-2396.
- [19]. Chong, C., Qi-Jin, Y., Hua Yan, J., Yong Chi 2011. Simulation of municipal solid waste in two different types of fixed bed reactors. *Fuel*. Article in Press.