

Kajian Pembakaran Sampah Plastik Jenis Polipropilena (PP) Menggunakan Insinerator

Annisa Jasmine Rudend dan Joni Hermana

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: hermana@its.ac.id

Abstrak—Pada kajian ini dilakukan perhitungan teoritis pembakaran sampah plastik jenis *polypropylene* menggunakan sistem *batch* dengan variabel kadar air dan jumlah sampah. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh kadar air dan jumlah PP terhadap perubahan suhu dan emisi gas pada sistem insinerasi serta menghitung Destruction Removal Efficiency (DRE) sampah pada insinerator. Kajian ini dilakukan berdasarkan unit insinerator yang memiliki kemampuan membakar sampah domestik dengan kapasitas 10 kg/jam. Sampah yang digunakan adalah sampah plastik jenis PP, kain, kayu, kertas dan kardus. Parameter uji dalam penelitian ini yaitu suhu ruang bakar insinerator dan emisi gas buang insinerator berupa SO₃ dan Cl₂. Kajian ini dilakukan berdasarkan: 1) Perhitungan termodinamika, 2) Perhitungan stoikiometri, 3) Perhitungan emisi polutan insinerator dan 4) Perhitungan DRE. Hasil dari kajian ini adalah peningkatan jumlah PP dan penurunan kadar air sampah akan menyebabkan kenaikan pada temperatur pembakaran. Sedangkan peningkatan jumlah PP dan penurunan kadar air sampah menyebabkan kenaikan pada konsentrasi emisi gas buang SO₃ dan Cl₂. Temperatur paling rendah adalah 1103,832 °C yang dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 5,13%, sedangkan temperatur paling tinggi adalah 1122,98 °C yang dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148%. Konsentrasi emisi gas buang paling rendah adalah 27,895 ppm SO₃ dan 63,137 ppm Cl₂ yang dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 7,58%, sedangkan konsentrasi paling tinggi adalah 32,564 ppm SO₃ dan 73,704 ppm Cl₂ yang dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148%. Nilai DRE paling tinggi adalah 96% dan paling rendah adalah 94,9%.

Kata Kunci—*Destruction Removal Efficiency*, Insinerator, Jumlah Sampah, Kadar Air, Polipropilena.

I. PENDAHULUAN

KEMUDAHAN teknologi menimbulkan dampak negatif yang tak kalah besar, yaitu penggunaan plastik. Keunggulan plastik dibandingkan dengan bahan material lain adalah kuat, ringan, murah, tidak mudah mengalami korosi, dan mudah dibentuk [1]. Indonesia mendapatkan ranking ke-2 sebagai penghasil sampah plastik terbesar di dunia dengan jumlah sampah plastik di Indonesia mencapai 85000 ton per tahun. 16 % sampah plastik akan didaur ulang namun hanya 2% sampah plastik yang bisa didaur ulang secara efektif, 14% sampah plastik akan dibakar, 40% terkubur dalam tempat pemrosesan akhir (TPA) dan 30% berakhir mencemari lingkungan [2].

Salah satu jenis plastik yang sering digunakan pada kehidupan sehari-hari adalah plastik jenis *polypropylene* (PP). PP adalah bahan material yang sering digunakan karena sifatnya yaitu tahan air, tahan terhadap bahan kimia, tahan terhadap temperatur tinggi, dan mudah dibentuk. Namun karena jumlahnya semakin meningkat serta sifatnya yang

sulit terurai, maka diperlukan perhatian lebih dalam pembuangannya[3]. Polypropylene merupakan plastik nomor 2 yang paling sering digunakan setelah Polyethylene dan paling sering digunakan pada kemasan produk. Pada tahun 2019, penjualan PP mencapai 126,03 milyar dollar sehingga perlu perhatian dalam pembuangannya [4].

Salah satu metode pengolahan sampah adalah dengan cara pembakaran (insinerasi). Insinerasi digunakan karena adanya keterbatasan lahan pada tempat pembuangan akhir. Sistem pembakaran insinerasi memiliki kelemahan yaitu kebutuhan energi sebagai pemantik pembakar sampah (*burner*) yang sangat besar. Sistem insinerasi mempunyai keunggulan yang mampu mengurangi volume sampah sebesar 90% lebih dengan waktu yang relatif singkat, serta dapat mendetoksifikasi bahan patogen hingga 100%. Selain itu, sistem insinerasi memiliki panas hasil pembakaran yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi [5].

Permasalahan yang dihadapi pada pengolahan termal sampah adalah tingginya kadar air, yang dapat mencapai 70% massa [6]. Kadar air sampah yang tinggi ini dapat menyebabkan turunnya suhu nyala pembakaran pada insinerator. Kinerja sistem pengolahan termal berupa kecepatan pembakaran, suhu dan komposisi gas buang dipengaruhi oleh beberapa parameter, diantaranya yaitu: komposisi dan sifat fisik sampah seperti kadar air sampah sehingga perlu dilakukan adanya kajian terhadap pembakaran sampah pada insinerator.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Plastik

Jenis plastik dibagi menjadi 7 (tujuh) macam yaitu;

1) *Polyethylene Terephthalate (PET)*

PET memiliki kekuatan mekanis layaknya besi, tapi dibawah banyak beban, lembaran plastik PET akan terulur lebih Panjang daripada besi sebelum akhirnya rusak. Biasanya digunakan dalam: botol air mineral, botol obat, botol kosmetik, dan lain-lain.

2) *High Density Polyethylene (HDPE)*

Adalah plastik dengan ketipisan paling tinggi dan paling kuat. Digunakan untuk pallet, drum, jerigen, *bulk container*, dan lain-lain.

3) *Polyvinyl Chloride (PVC)*

Merupakan hasil polimerisasi dari *vinyl chloride monomer (VCM)*. PVC memiliki ketahanan yang bagus terhadap minyak dan lemak, memiliki permukaan yang jernih. PVC dapat menjadi lembek dalam temperatur yang rendah (80–95°C). Penggunaannya adalah: pipa air, pipa bangunan, dan lain-lain.

Tabel 1.
Data awal

Komponen sampah	Variasi (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Polypropylene	50	50	60	60	70	70	80	80
Kain	25	25	20	20	15	15	10	10
Kayu	25	0	20	0	15	0	10	0
Kertas dan Kardus	0	25	0	20	0	15	0	10

Tabel 2.
Data variasi kadar air sampah

Variasi Sampah	Kadar Air (%)
1	7,58
2	5,13
3	6,096
4	4,136
5	4,612
6	3,142
7	3,128
8	2,148

4) *Low Density Polyethylene (LDPE)*

Mudah dicetak dalam bentuk selang serta mudah dibentuk. Lembaran plastik LDPE dapat diberi pewarna dengan mudah. Biasanya digunakan untuk berbagai macam kresek makanan.

5) *Polypropylene (PP)*

Memiliki massa jenis paling rendah dan titik leleh paling tinggi dari semua jenis termoplastik serta memiliki harga yang relatif murah. Plastik serbaguna ini dapat diproses menjadi berbagai macam kemasan makanan dalam bentuk fleksibel maupun kaku. Penggunaannya adalah: gelas plastik, mainan anak, wadah mentega, dan lain-lain.

6) *Polystyrene (PS)*

Memiliki transparansi tinggi dan bersifat kaku. Bahan styrene dihindari untuk kemasan makanan, dikarenakan dapat masuk ke makanan dan berbahaya untuk otak dan syaraf manusia. Contoh penggunaannya adalah: tempat makan sekali pakai, tempat telur, dan lain-lain.

7) *Other*

Terbuat dari selain enam golongan diatas, atau terbuat dari lebih dari satu jenis resin dan digunakan dalam bermacam-macam lapisan. Contohnya adalah: botol susu bayi, sikat gigi, computer, mainan *lego*, dan lain-lain [7].

B. *Polipropilena (PP)*

Massa jenis PP adalah antara 0,91 – 0,94 g/cm³. PP memiliki titik leleh yaitu 160-166 °C. Memiliki sifat sangat mirip dengan *polyethylene* (PE), namun PP lebih kuat dan ringan dengan daya tembus uap yang rendah, ketahanan yang baik terhadap lemak, stabil terhadap suhu tinggi dan cukup mengkilap. Monomer PP diperoleh dengan pemecahan secara termal *naphtha* (distilasi minyak kasar) etilen, *propylene* dan *homologues* yang lebih tinggi dipisahkan dengan distilasi pada temperatur rendah. Dengan menggunakan katalis Natta-Ziegler, polipropilen dapat diperoleh dari propilen. PP adalah bahan plastik yang dipakai pada kemasan makanan ringan, sedotan, kantong obat, penutup, dll [8].

C. *Insinerator*

Insinerator adalah teknologi pengolahan sampah dengan cara pembakaran zat organik dalam material sampah. Insinerator mengkonversi materi sampah menjadi energi panas, *flue gas*, dan *ash* yang kemudian dilepaskan ke atmosfer. *Flue gas* yang dihasilkan oleh insinerator mengandung nitrogen, karbon dioksida, dan sulfur dioksida, yang masing-masing memiliki fungsinya tersendiri apabila

Tabel 3.
Berat atom komposisi sampah

Elemen	lb-atom	% atom
C	1,40	33,34
H	2,67	63,83
Cl	0,0004	0,01
S	0,0003	0,01
O	0,12	2,77
N	0,002	0,05
Total	5,66	100,00

Tabel 4.
Konstanta reaksi pembakaran

Simbol	Konstanta	Elemen
z	0,140	C
y	0,267	H
w	0,00004	Cl
v	0,00003	S
x	0,012	O
u	0,0002	N
r	0,000	F
s	0,000	Br
t	0,000	I
w+r	0,00004	
Ø	0,067	

digunakan secara optimal. Keuntungan dari insinerator adalah teknologi ini dapat mereduksi massa padatan sampah organik sebanyak 80-85% dan volume sebanyak 95-96% [8].

D. *Faktor Yang Mempengaruhi Pembakaran Sempurna*

1) *Temperatur*

Temperatur pembakaran merupakan fungsi nilai bakar (*heating value*) sampah dan bahan bakar tambahan dari luar, rancangan alat pembakar (insinerator), suplai udara dan kontrol pembakaran. Pembakaran sempurna memerlukan temperatur tinggi, secara umum temperatur lebih tinggi dari 650 °C. dan waktu tinggal 1-2 detik dapat menghasilkan pembakaran sempurna pada makanan dan sampah rumah tangga. Temperatur lebih tinggi sekitar 1000°C diperlukan untuk membakar campuran sampah yang mengandung bahan berbahaya seperti sampah medis dengan waktu tinggal minimal 1 detik dapat menghasilkan polutan seperti dioksin, furan, asap dan abu.

2) *Waktu Tinggal*

Pembakaran sempurna membutuhkan waktu tinggal yang cukup, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk menjamin terjadinya pencampuran yang sempurna antara udara dan bahan bakar agar dapat bereaksi secara sempurna. Pembakaran pada temperatur rendah, sampah dengan nilai panas rendah dan turbulensi campuran gas yang rendah memerlukan waktu tinggal yang lebih lama untuk menghasilkan pembakaran yang sempurna. Suhu pembakaran sangat berpengaruh pada pengoperasian insinerator, karena semakin tinggi suhu pembakaran dan semakin lama waktu pembakaran akan menghasilkan abu yang sedikit dan kuliatas abu serta asap paling baik [9].

3) *Turbulensi*

Turbulensi pencampuran gas yang terbakar dan udara diperlukan untuk menjamin terjadinya kontak yang cukup antara bahan bakar dan udara. Hal ini dapat menghasilkan temperatur yang tinggi sehingga menyebabkan pembakaran sempurna. Tingkat pencampuran tergantung dari rancangan ruang bakar insinerator dan sistem injeksi udara. Sistem pembakaran dengan sirkulasi udara alami pada sistem pembakaran terbuka tidak dapat menghasilkan pencampuran yang baik. Demikian juga tumpukan sampah yang terlalu

Tabel 5.
Tekanan parsial gas buang

Komponen	Jumlah mol	Tekanan Parsial (atm)
CO ₂	0,070	0,0704
H ₂ O	0,067	0,0673
HCl	0,0002	0,01408
O ₂	0,101	0,101
N ₂	0,761	0,7609
SO ₂	0,000026	0,00003
Cl ₂	0,0000859	0,0001
SO ₃	0,0000411	0,00004
Total	1,000	1,000

Tabel 6.
Komposisi gas buang awal

Komponen	%Mol	Lb mol	Mr	Lb	%Massa
CO ₂	7,037	1,396	44,010	61,442	10,731
H ₂ O	6,754	1,336	18,016	24,077	4,205
HCl	1,413	0,000	36,458	0,013	0,002
O ₂	10,108	2,007	32,000	64,214	11,215
N ₂	76,113	15,100	28,000	422,806	73,843
SO ₂	0,003	0,000	64,060	0,019	0,003
Cl ₂	0,009	0,000	70,900	0,000	0,000
SO ₃	0,004	0,000	80,060	0,000	0,000
Total	101,435	19,840		572,572	100,000

tinggi dapat mengganggu turbulensi pencampuran udara dan gas yang mudah terbakar karena tersumbatnya rongga jalur aliran kedua bahan ini. Rancangan insinerator yang dapat menghasilkan pembakaran sempurna menggunakan sistem sirkulasi paksa (*forced circulation*) untuk memperoleh turbulensi pencampuran.

4) *Komposisi Sampah*

Karakteristik sampah seperti nilai panas, kandungan air dan sifat kimia (kandungan C, H, O, N, S dan Cl) sampah berpengaruh terhadap proses pembakaran dan jenis polutan pada gas buang dan abu. Semakin tinggi temperatur, waktu tinggal dan derajat pencampuran gas dan udara semakin mendekati pembakaran sempurna dan semakin kecil pengaruh karakteristik sampah terhadap tingkat kesempurnaan pembakaran.

III. METODOLOGI

A. *Kajian Pustaka*

Kajian pustaka dilakukan dengan menelusuri berbagai referensi yang berkaitan dengan Insinerator, plastik PP, pembakaran sempurna, dan DRE. Dari hasil penelusuran pustaka ini, tulisan disusun kembali menggunakan bahasa penulis sendiri. Jenis kepustakaan yang dipelajari meliputi: buku teks, jurnal, laporan penelitian, laporan seminar/*proceeding*, dan bulletin.

B. *Studi Kasus*

Studi kasus dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah menghitung secara teoritis pembakaran pada unit insinerator domestik yang belum pernah diuji sebelumnya dengan referensi dari data sekunder dan berbagai pustaka yang telah dipelajari. Data yang diambil adalah data sekunder yang diperoleh dari: Tugas Akhir, jurnal, tesis, dan *website*.

C. *Simulasi Berbantuan Excel*

Data yang didapat dianalisa dengan kajian pustaka yang telah dipelajari. Perhitungan secara teoritis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pembakaran plastik PP pada unit insinerator domestik dengan variasi jumlah PP dan kadar air

Tabel 7.
Kapasitas panas

Komponen	gmole per gram sampah	a	b*10 ³	c*10 ⁻⁵	Δa	Δb
CO ₂	1,40E-02	10,57	2,1	-2,06	0,148	0,000
H ₂ O	1,34E-02	7,3	2,46	0	0,098	0,000
HCl	3,64E-06	6,27	1,24	0,3	0,000	0,000
O ₂	2,01E-02	7,16	1	-0,4	0,144	0,000
N ₂	1,51E-01	6,83	0,9	-0,12	1,031	0,000
SO ₂	2,95E-06	11,04	1,88	-1,84	0,000	0,000
Cl ₂	1,82E-08	8,85	0,16	-1,8	0,000	0,000
SO ₃	2,95E-08	13,9	6,1	-3,22	0,000	0,000
Total					1,420	0,000

Tabel 8.
Konsentrasi sulfur dioksida (SO₃), dan konsentrasi Cl₂

Laju alir massa (lb/jam)	128,516
Laju alir molar (Lbmol/hr)	4,374
R	0,730
Laju alir volumetrik (ft ³ /jam)	7999,827
Laju alir volumetrik (acfm)	133,330
Konsentrasi SO ₃ (ppm)	31,173
Konsentrasi Cl ₂ (ppm)	70,549

Tabel 9.
Perhitungan DRE

Variasi	Komponen Sampah (%)				DRE (%)
	PP	Kain	Kayu	Kertas dan Kardus	
1	50	25	25	0	96,00
2	50	25	0	25	94,90
3	60	20	20	0	95,91
4	60	20	0	20	95,03
5	70	15	15	0	95,82
6	70	15	0	15	95,16
7	80	10	10	0	95,73
8	80	10	0	10	95,29

sampah terhadap temperatur dan gas buang yang dihasilkan. Langkah-langkah perhitungan yang digunakan adalah:

1. Memasukkan data awal
2. Mengkonversi komposisi sampah dari basis massa ke basis atom
3. Menentukan persamaan stoikiometrik
4. Mengestimasi *Net Heating Value* (NHV)
5. Mengestimasi temperatur operasi rata-rata
6. Menghitung konstanta kesetimbangan reaksi kimia
7. Menghitung tekanan parsial gas buang
8. Menghitung komposisi gas buang akhir
9. Menghitung *Destruction Removal Efficiency* (DRE)

Data perhitungan teoritis berupa temperatur rata-rata, konsentrasi emisi gas buang, dan DRE yang diperoleh dari semua variasi akan dimasukkan kedalam *bar chart* untuk dibandingkan dan dianalisa sesuai literatur yang tersedia.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah pertama adalah memasukkan data awal. Data awal yang dibutuhkan adalah: jumlah sampah dan jenis sampah yang diinsinerasi, serta berapa *excess air* yang akan digunakan. Data awal dapat dilihat pada Tabel 1. Data variasi kadar air sampah dapat dilihat pada Tabel 2

Langkah kedua adalah mengkonversi komposisi sampah dari basis massa menjadi basis atom dan melakukan *proximate* dan *ultimate analysis*. Analisis masing-masing elemen pembentuk sampah menjadi basis atom berdasarkan presentase elemen dan berat atomnya. Sampel padat yang dianalisa secara *wet basis* dikonversi menjadi *dry basis*. Untuk mengkonversi dari *wet basis* menuju *dry basis*, jumlah

Tabel 10.

Jumlah PP terhadap temperatur insinerator		
Variasi	Jumlah PP (%)	Temperatur (°C)
1	50,00%	1105,553
2	50,00%	1103,832
3	60,00%	1110,627
4	60,00%	1109,358
5	70,00%	1114,893
6	70,00%	1114,011
7	80,00%	1118,53
8	80,00%	1122,982

Tabel 11.

jumlah PP terhadap emisi gas buang insinerator			
Variasi	Jumlah PP (%)	SO ₃ (ppm)	Cl ₂ (ppm)
var 1	50,00%	27,895	63,137
var 2	50,00%	29,131	65,934
var 3	60,00%	28,601	64,736
var 4	60,00%	30,367	68,732
var 5	70,00%	29,641	67,089
var 6	70,00%	31,367	70,996
var 7	80,00%	31,465	71,218
var 8	80,00%	32,564	73,704

Tabel 12.

Kadar air terhadap temperatur insinerator		
Variasi	Kadar Air Sampah (%)	Temperatur (°C)
1	7,58	1105,553
2	5,13	1103,832
3	6,096	1110,627
4	4,136	1109,358
5	4,612	1114,893
6	3,142	1114,011
7	3,128	1118,53
8	2,148	1122,982

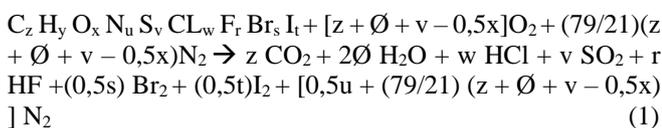
Tabel 13.

Kadar air terhadap emisi gas buang insinerator			
Variasi	Kadar Air Sampah (%)	SO ₃ (ppm)	Cl ₂ (ppm)
1	7,58	27,895	63,137
2	5,13	29,131	65,934
3	6,096	28,601	64,736
4	4,136	30,367	68,732
5	4,612	29,641	67,089
6	3,142	31,367	70,996
7	3,128	31,465	71,218
8	2,148	32,564	73,704

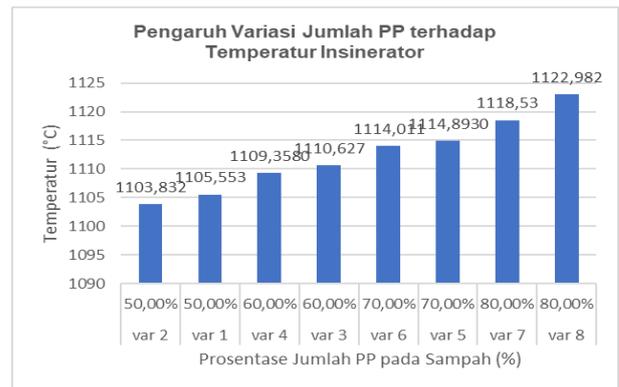
dibagi dengan fraksi desimal dari berat kering sampel. Misalnya pada suatu sampel dalam keadaan *wet basis* mengandung 25 mg/kg barium dan kadar air 12, maka berat keringnya adalah $100 - 12 = 88\%$. Kandungan barium pada sampel dalam keadaan *dry basis* adalah $25 / 0,88 = 28,4$ mg/kg.

Proximate analysis adalah analisis terhadap kelembapan sampah, kandungan volatil di dalam sampah, fixed carbon, dan ash dalam sampah. Sedangkan ultimate Analysis adalah analisis terhadap unsur-unsur kimia penyusun sampah. Sampah mengandung komponen karbon, hydrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan ash. Analisis ini sangat menentukan system pengolahan sampah yang efektif digunakan untuk memusnahkan sampah [10]. Berat atom komposisi sampah dapat dilihat pada Tabel 3.

Langkah ketiga adalah menentukan persamaan stoikiometri dengan persamaan:



Gambar 1. Grafik pengaruh variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap DRE.



Gambar 2. Grafik pengaruh jumlah PP terhadap temperatur incinerator.

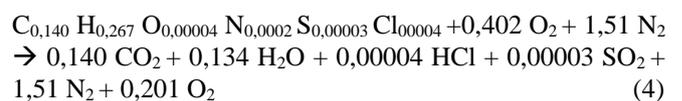
Dimana:

$$\emptyset = \frac{y-w-r}{4} \text{, jika } y > (w+r) \quad (2)$$

$$\emptyset = 0 \text{, jika } y \leq (w+r) \quad (3)$$

Konstanta reaksi pembakaran dapat dilihat pada Tabel 4.

Dengan *excess air* sebanyak 100%, oksigen dan nitrogen didalam persamaan stoikiometrik dikalikan menjadi 2 sehingga reaksi pembakaran menjadi:

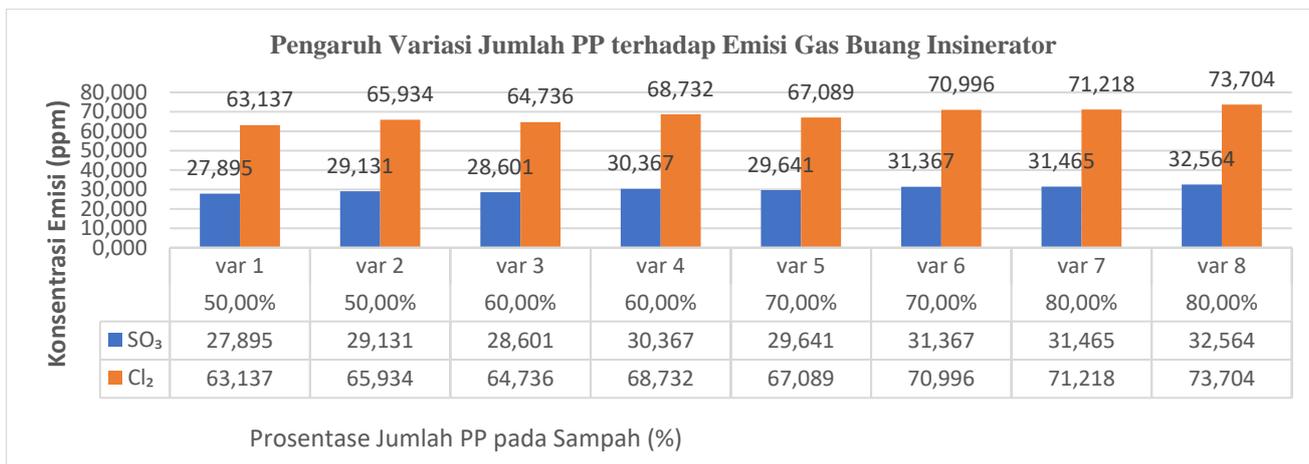


Langkah keempat adalah estimasi *net heating value* (NHV) Menggunakan metode Dulong untuk mengestimasi NHV berdasarkan presentase massa dari elemen penyusun sampah. Metode Dulong digunakan saat data panas pembakaran tidak tersedia. Metode ini dapat dilakukan pada sampah yang mengandung karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, dan/atau klorin. Namu tidak berlaku pada sampah yang mengandung fluorin, bromin, dan Iodin. Persamaannya adalah:

$$NHV_{Btu/lb} = 14000 m_c + 45000 (m_H - 0,125 m_o) - 760 m_{cl} + 4500 m_s = 15676,58 \text{ Btu/lb} = 8700,5 \text{ Cal/g} \quad (5)$$

Keterangan:

- m_c = persentase massa karbon pada *dry basis*
- m_H = persentase massa hydrogen pada *dry basis*
- m_o = persentase massa oksigen pada *dry basis*
- m_{cl} = persentase massa klor pada *dry basis*
- m_s = persentase massa sulfur pada *dry basis*



Gambar 3. Grafik pengaruh jumlah PP terhadap konsentrasi SO₃ dan Cl₂.

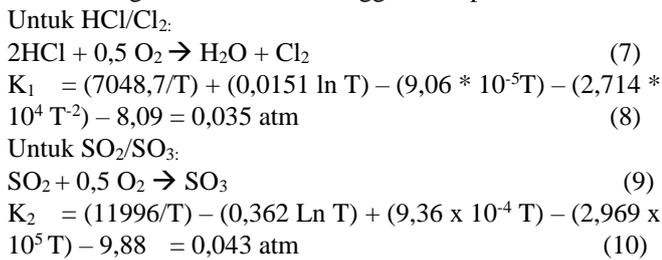
Langkah kelima adalah estimasi awal temperatur kerja rata-rata insinerator dengan persamaan:

$$T = 60 + (NHV/0,3) / [1 + (1+EA)(7,5 \times 10^{-4})(NHV)] = 1199,76 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{6}$$

Keterangan:

- EA = *Excess Air* pada data awal
- NHV = *Net Heating Value* dari tahap 4

Langkah keenam adalah menghitung konstanta kesetimbangan reaksi kimia menggunakan persamaan



Langkah ketujuh adalah menghitung tekanan parsial gas buang dengan persamaan:

$$K_1 = \frac{P(\text{Cl}_2)P(\text{H}_2\text{O})}{P(\text{HCl})^2 P(\text{O}_2)^{0,5}} \tag{11}$$

$$K_2 = \frac{P(\text{SO}_3)}{P(\text{SO}_2)P(\text{O}_2)^{0,5}} \tag{12}$$

Sehingga didapatkan tekanan parsial gas buang pada Tabel 5.

Langkah kedelapan adalah menentukan komposisi gas buang awal yang didapatkan berdasarkan tekanan parsial dan koefisien pada persamaan stoikiometrik reaksi yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Langkah kesembilan adalah menghitung suhu kerja insinerator sebenarnya dengan persamaan:

$$\text{NHV}(\text{kal.g}) + \Delta a (T-298) + (\Delta b/2)(T^2-298^2) - \Delta c [(1/T) - (1/298)] = 0 \tag{13}$$

Kapasitas panas tiap komponen dapat dilihat pada Tabel 7. Langkah kesepuluh adalah menghitung hasil akhir yaitu gas buang yang terdiri dari konsentrasi sulfur dioksida (SO₃), dan konsentrasi Cl₂ yang dapat dilihat pada Tabel 8.

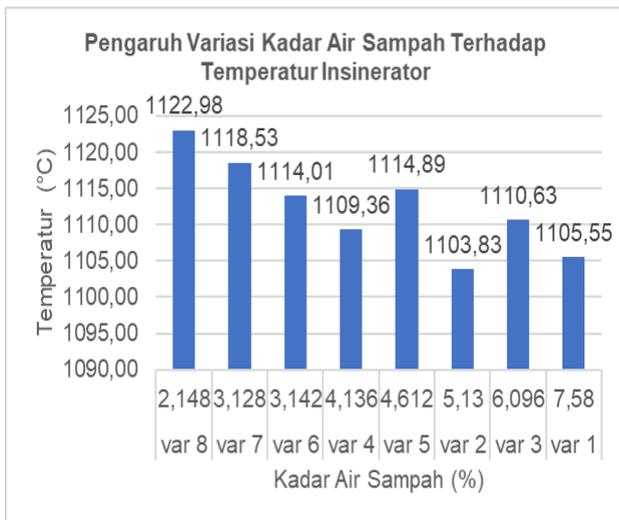
Selanjutnya menghitung DRE tiap variasi dengan menggunakan persamaan :

$$\text{DRE } 9\%) = \frac{\text{Bobot sampah masuk} - \text{bobot sisa pembakaran}}{\text{Bobot sampah masuk}} \times 100\% \tag{14}$$

Perhitungan DRE dapat dilihat pada Tabel 9. Grafik pengaruh variasi jumlah PP dan kadar air sampah terhadap DRE ada pada gambar 1. Grafik pada Gambar 1 diatas menunjukkan DRE yang berbeda-beda dari tiap variasi sampah. Variasi antara jumlah PP dan kadar air sampah memperikan pengaruh terhadap hasil pembakaran sampah. Nilai DRE tertinggi ada pada variasi 1 dengan nilai 96% yang sampahnya terdiri dari 5 kg PP, 2,5 kg kain, 2,5 kg kayu, dan 0 kg kertas dan kardus. Variasi 1 menghasilkan nilai DRE paling tinggi dikarenakan berat abu setelah pembakaran pada variasi 1 ini paling kecil yaitu 0,4 kg. Sedangkan nilai DRE terendah adalah variasi 2 yaitu 94,90% yang komposisi sampahnya adalah 5 kg PP, 2,5 kg kain, 0 kg kayu, dan 2,5 kg kertas dan kardus. Hal ini terjadi karena berat abu hasil pembakaran pada sampah variasi 2 paling banyak yaitu 0,51 kg. Grafik pengaruh jumlah PP terhadap temperatur insinerator ada pada Tabel 10 dan Gambar 2. Grafik pada Gambar 2 diatas menunjukkan perbandingan temperatur pembakaran sampah dengan variasi jumlah sampah PP 50%, 60%, 70%, dan 80%. Temperatur pembakaran paling rendah dihasilkan dari variasi 2 dengan presentase jumlah PP sebanyak 50% yaitu sebesar 1103,832 °C dan temperatur pembakaran paling tinggi dihasilkan dari variasi 8 dengan presentase jumlah PP sebanyak 80% yaitu sebesar 1122,982 °C. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi jumlah

plastik PP, maka semakin tinggi suhu ruang bakar insinerator. Hal ini terjadi karena PP memiliki kadar volatil yang cukup tinggi yaitu 93,77% (Hakeem,2018) yang menjadikan nilai kalor pembakaran menjadi sangat tinggi pula yaitu 46 MJ/kg sehingga mampu menaikkan temperatur pada ruang bakar insinerator.

Grafik pengaruh jumlah PP terhadap emisi gas buang insinerator ada pada Tabel 11 dan Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan konsentrasi SO₃ dan Cl₂ paling rendah dihasilkan oleh variasi 1 dengan presentase jumlah PP 50% dengan nilai 27,895 ppm untuk SO₃ dan 63,137 ppm untuk

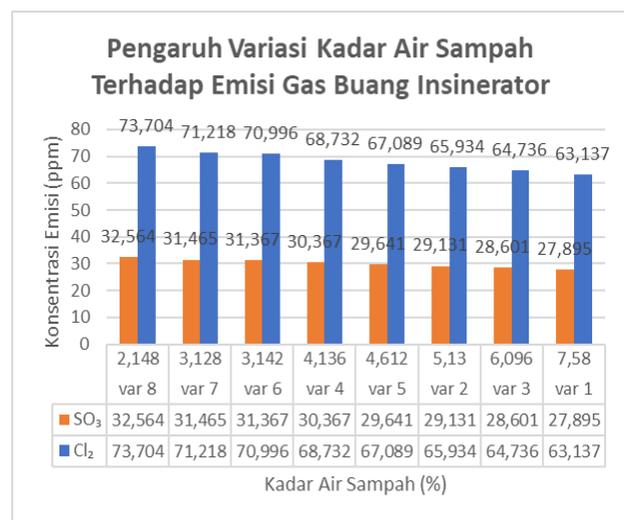


Gambar 4. Grafik pengaruh kadar air terhadap temperatur insinerator.

Cl₂. Sedangkan konsentrasi paling tinggi dihasilkan oleh variasi 8 dengan presentase jumlah PP 80% dengan nilai 2,564 ppm untuk SO₃ dan 73,704 ppm untuk Cl₂. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi jumlah plastik PP, maka semakin tinggi konsentrasi SO₃ dan Cl₂. Hal ini terjadi karena kandungan volatil PP yang tinggi membuat waktu kerja insinerator menjadi semakin lama sehingga dapat meningkatkan konsentrasi gas buang insinerator.

Grafik pengaruh kadar air terhadap temperatur insinerator ada pada Tabel 12 dan Gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa variasi 8 dengan kadar air sampah 2,148% menghasilkan temperatur kerja insinerator paling tinggi yaitu 1122,982 °C dan variasi 2 dengan kadar air sampah 5,13% menghasilkan temperatur kerja paling rendah yaitu 1103,8 °C. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi kadar air sampah, maka terjadi kecenderungan penurunan temperatur pada ruang bakar insinerator walaupun hasil temperatur pembakaran tidak selalu turun . Karena pada teorinya, hal ini terjadi karena energi panas pembakaran terlebih dahulu menguapkan kandungan air pada sampah yang menyebabkan proses pembakaran menjadi kurang maksimal sehingga kelembapan sampah yang tinggi ini dapat mengurangi nilai pemanasan dan berakibat mengurangi efisiensi konversi dan kerja insinerator, karena sejumlah besar energi panas akan digunakan untuk penguapan sehingga dapat mencegah keberlanjutan pembakaran.

Grafik pengaruh kadar air terhadap emisi gas buang insinerator ada pada Tabel 13 dan Gambar 5. Gambar 5. menunjukkan emisi SO₃ dan Cl₂ paling tinggi dihasilkan dari pembakaran sampah variasi 8 dengan kadar air sampah paling rendah yaitu 2,148% dengan nilai 32,564 ppm untuk SO₃ dan 73,704 ppm untuk Cl₂. Sedangkan emisi paling rendah dihasilkan dari pembakaran sampah variasi 1 dengan kadar air sampah paling tinggi yaitu 7,58% dengan nilai 27,895 ppm untuk SO₃ dan 63,137 ppm untuk Cl₂. Dari grafik diatas diketahui bahwa semakin tinggi kadar air sampah, maka semakin rendah konsentrasi SO₃ dan Cl₂ pada ruang bakar insinerator. Hal ini terjadi karena kenaikan kadar air membatasi keluarnya gas-gas hitam berbahaya dari insinerator. Semakin tinggi kandungan air sampah, maka semakin sulit dan lama terjadinya reaksi pembakaran dan semakin tinggi kandungan air, maka semakin tidak sempurna reaksi pembakaran yang terbentuk.



Gambar 5. Grafik pengaruh kadar air terhadap emisi gas buang insinerator.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang telah dilakukan adalah Variasi Jumlah PP dari 50% hingga 80% dan kadar air sampah dari 2,148% hingga 7,58% berpengaruh pada perubahan temperatur pembakaran insinerator yang dihasilkan. Temperatur paling rendah dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 5,13% yaitu sebesar 1103,832 °C sedangkan temperatur paling tinggi dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148% yaitu sebesar 1122,98 °C. Peningkatan jumlah PP mengakibatkan temperatur pembakaran juga meningkat. Semakin tinggi kandungan kadar air sampah, temperatur pembakaran akan semakin menurun.

Variasi Jumlah PP dari 50% hingga 80% dan kadar air sampah dari 2,148% hingga 7,58% berpengaruh pada perubahan konsentrasi emisi gas buang insinerator. Konsentrasi paling rendah dihasilkan oleh jumlah PP 50% dan kadar air 7,58% yaitu sebesar 27,895 ppm SO₃ dan 63,137 ppm Cl₂ sedangkan konsentrasi paling tinggi dihasilkan oleh jumlah PP 80% dan kadar air 2,148% yaitu sebesar 32,564 ppm SO₃ dan 73,704 ppm Cl₂. Peningkatan jumlah PP mengakibatkan emisi gas buang SO₃ dan Cl₂ meningkat. Semakin tinggi kadar air sampah, emisi gas buang akan semakin menurun.

Destruction Removal Efficiency (DRE) dari masing-masing variasi sampah yang dibakar pada insinerator berbeda-beda, dengan DRE paling tinggi adalah variasi 1 yaitu 96% dengan presentase jumlah sampah 50% PP, 25% kain, dan 25% kayu. dan DRE paling rendah adalah variasi 2 yaitu 94,9% dengan presentase jumlah sampah 50% PP, 25% kain, dan 25% kardus dan kertas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. F. Chang, C. J. Lin, J. M. Chyan, I. M. Chen, and J. E. Chang, "Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan," *J. Environ. Manage.*, vol. 85, no. 4, pp. 891–899, 2007, doi: 10.1016/j.jenvman.2006.10.025.
- [2] S. Naryono, E., Atikah., Rachmansyah, A., "Simulasi dan evaluasi insinerasi sampah organik rumah tangga pada reaktor unggun tetap (fixed bed)," *Indones. Green Technol. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 28–35, 2015.
- [3] M. Syamsiro, A. N. Hadiyanto, and Z. Mufrodi, "Rancang bangun

- mesin pencacah plastik sebagai bahan baku mesin pirolisis skala komunal,” *J. Mek. dan Sist. Termal*, vol. 1, no. 2, pp. 43–48, 2016.
- [4] World Economic Forum, “If you recycled all the plastic waste on the planet, you would be the world’s richest person,” *World Economic Forum, 91-93 Route de la Capite, CH-1223 Cologny/Geneve, Switzerland*, 2018. .
- [5] H. A. Maddah, “Polypropylene as a promising plastic: a review,” *Am. J. Polym. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2016.
- [6] A. M. Globesnewswire, Howard, B. C., Abdelrahman, “Exactly what every plastic recycling symbol actually means,” *The Good Housekeeping offices and Good Housekeeping Institute, 300 W. 57th Street, New York City*, 2020. .
- [7] G. Tchobanoglous, H. Theisen, and V. Samuel, *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues / George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel Vigil*, vol. 41, no. 3, 1993.
- [8] P. G. Nidoni, “Incineration process for solid waste management and effective utilization of byproducts,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 12, pp. 378–382, 2017.
- [9] M. M. Rhozman, F., Ilham, “Analisa dan evaluasi rancang bangun insinerator sederhana dalam mengelola sampah rumah tangga,” *J. Mesin Nusant.*, vol. 2, no. 1, pp. 52–60, 2019.
- [10] L. Skubal, “Environmental sampling and analysis: lab manual,” *Environ. Prog.*, vol. 18, no. 1, 1999, doi: 10.1002/ep.670180110.