



Uji Kinerja Insinerator dan Alat Pengendali Pencemaran Udara untuk Meminimalkan Dampak Limbah B3

Performance Testing of Incinerator and Air Pollution Control Tools to Minimize the Impact of Hazardous Waste

NININ GUSDINI*, NADYA MEDIANA, RATIH PRATIWI

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Sahid Jakarta

*ninin_gusdini@usahid.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 June 2022

Accepted 23 December 2022

Published 31 January 2023

Keywords:

Incinerator

Combustion efficiency

Emission

Hazardous waste

Destruction coefficient

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze the performance of the incinerator based on indicators: combustion efficiency, gas residence time, destruction level, hazardous waste removal, and quality of air emissions. The measured emission parameters were particulates, CO and CO₂, heavy metals, opacity, SO₂, NO₂, HF, HCl, and total hydrocarbon. The method used was a field experiment, which was a direct test of the incinerator's combustion process, observing the process that occurs and calculating the parameters that are indicators of the incinerator's performance. The results showed that the combustion efficiency at 80% (500 kg/hour) feeding load was 99.9999% and 100% (700kg/hour) was 99.9997%. The average residence time for 80% feeding load is 6.05 seconds and for 100% is 6.42 seconds. The destruction and removal efficiency at 80 and 100% feeding loads was 99.9998%. The emission quality as measured by the particulate parameters, gas composition, heavy metals (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Tl) and opacity from the incinerator stack all meet the quality standard of Minister of Environment and Forestry Regulation No 6/2021. Based on the test results, it is shown that the incinerator has good performance when using 100% feeding load.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 19 Juni 2022

Disetujui 23 Desember 2022

Diterbitkan 31 Januari 2023

Kata kunci:

Insinerator

Efisiensi pembakaran

Emisi

Limbah B3,

Koefisien penghancuran

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kinerja insinerator yang digunakan berdasarkan indikator: tingkat efisiensi pembakaran, waktu tinggal gas, tingkat penghancuran dan penghilangan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun), serta mengukur kualitas emisi udara. Emisi yang diukur meliputi partikulat, gas CO dan CO₂, logam berat, opasitas, SO₂, NO₂, HF, HCl dan total hidrokarbon. Metode yang digunakan adalah eksperimen lapangan, yaitu melakukan uji coba langsung pada proses pembakaran di insinerator dan mengamati proses yang terjadi dan menghitung parameter-parameter yang menjadi indikator kinerja insinerator. Hasil uji lapangan diperoleh bahwa efisiensi pembakaran pada beban pengumpanan 80% (500 kg/jam) adalah 99,9999% dan 100% (700 kg/jam) adalah 99,9997%. Rerata waktu tinggal untuk beban pengumpanan 80% adalah 6,05 detik dan 100% adalah 6,42 detik. Efisiensi penghancuran dan penghilangan pada beban pengumpanan 80 dan 100% adalah 99,9998%. Kualitas emisi yang diukur dari parameter partikulat, komposisi gas, logam berat (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Tl) dan opasitas dari cerobong insinerator semuanya memenuhi baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 Tahun 2021. Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa proses pengolahan limbah B3 pada insinerator yang digunakan memiliki kinerja yang baik pada saat penggunaan beban pengumpanan 100%.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai salah satu negara berkembang di dunia mengalami peningkatan industri yang sangat pesat (Chen *et al.*, 2020). Kegiatan industri terutama industri berbasis kimia tidak dapat dipungkiri menghasilkan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang sulit untuk diolah (Fatimah *et al.*, 2020). Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada tahun 2014, limbah B3 di Indonesia mencapai 206 juta ton dan yang berhasil dikelola sebesar 193 juta ton, dari data ini maka limbah B3 yang belum berhasil dikelola sebesar 13 juta ton. Di Indonesia, perusahaan pengolahan limbah B3 yang memiliki izin pengoperasian insinerator hanya ada 22 perusahaan dengan rata-rata kapasitas pengolahan 170 ton/hari.

Pada tahun 2018 terdapat 93 rumah sakit yang memiliki izin pengoperasian insinerator untuk mengolah limbah medis dengan kapasitas 50 ton/hari. Data di atas menunjukkan bahwa Indonesia belum bisa mengolah semua limbah B3 yang dihasilkan baik oleh industri maupun rumah sakit karena sarana dan prasarana yang kurang.

Produksi limbah B3 dari industri maupun rumah sakit memiliki jumlah yang tinggi, maka dibutuhkan teknologi insinerasi yang dapat mengolah limbah B3 (Shen *et al.*, 2022). Insinerasi merupakan teknologi pengolahan limbah yang dapat memusnahkan komponen berbahaya, mereduksi volume limbah sampai 5–15% menjadi abu, dan menghasilkan energi (Chandra *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Di sisi lain, penggunaan insinerator memiliki risiko terhadap pencemaran udara bila proses insinerasi tidak di kendalikan dan tidak dilengkapi dengan alat pengendali pencemaran udara. Untuk memastikan bahwa proses insinerasi yang dilakukan berjalan maksimal dan tidak mencemari lingkungan maka perlu dilakukan uji kinerja insinerator (Xia *et al.*, 2022).

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja insinerator berdasarkan kriteria proses insinerasi dan kualitas emisi dari proses pembakaran. Kriteria proses insinerasi berjalan optimal didasarkan pada tingkat efisiensi pembakaran dengan menghitung tingkat penghancuran dan penghilangan (*destruction removal efficiency, DRE*). Pada penelitian ini, kualitas emisi diarahkan pada waktu tinggal gas, sedangkan temperatur dan turbulensi tidak diperhitungkan karena kondisinya relatif sama pada setiap perlakuan.

2. METODE

Penelitian bersifat eksperimental, dengan dua variasi perlakuan, yaitu pengumpulan limbah sebesar 100% kapasitas ruang pembakaran dan 80% kapasitas ruang pembakaran. Limbah yang digunakan berasal dari limbah B3 industri dan rumah sakit yang diperoleh dari Pusat Pengolahan Limbah B3.

2.1 Jenis Limbah yang Digunakan

Limbah yang digunakan dalam pengujian kinerja berasal dari limbah B3 berbagai industri dan rumah sakit. Jenis dan jumlah limbah yang digunakan dalam setiap proses pembakaran dikondisikan sama. Jenis limbah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi limbah yang diinsinerasi

No	Jenis limbah B3	Karakteristik	Komposisi (%)
1	Majun kontaminasi	Beracun	20
2	Kemasan plastik <i>reject</i>	Beracun	10
3	<i>Hose</i>	Beracun	10
4	<i>Filter oil/kertas</i>	Beracun	8
5	<i>Filter bag/plastik</i>	Beracun	8
6	<i>Sludge IPAL</i>	Beracun	10
7	Limbah farmasi	Infeksius	4
8	Limbah medis	Infeksius	20
9	<i>Saw dust/serbuk gergaji</i>	Beracun	5
10	Kemasan bekas	Beracun	5

2.2 Jenis-Jenis Insinerator yang Digunakan

Insinerator yang digunakan untuk uji coba adalah tipe CRE-500. Insinerator tersebut terdiri dari ruang pembakaran dengan lapisan tahan panas (*refractory-lined*) yang terbagi menjadi dua ruang bakar (*primary chamber* dan *secondary chamber*). Limbah dibakar di dalam *primary chamber* dengan *grate* statis. Gas dan partikel hasil pembakaran limbah di dalam *primary chamber* akan masuk ke *secondary chamber*. Ruang pembakar dirangkai secara horizontal. Temperatur operasi berkisar antara 900–1.000 °C. Pemasokan limbah ke dalam insinerator dilakukan dengan memasukkan limbah melalui *bucket lift* dan *ramfeeder*. Visualisasi insinerator yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Insinerator Tipe CRE-500 (Keterangan: 1. Siklon; 2. Cerobong; 3. Ruang Bakar 2; 4. Ruang Bakar 1

Gas hasil pembakaran dan abu sisa pembakaran kemudian menuju ke pengendali pencemaran yaitu siklon. Partikel debu hasil sisa pembakaran akan ditangkap di siklon dan diteruskan ke pembuangan abu sisa pembakaran. Gas yang terbentuk dari hasil pembakaran akan menuju ke *water scrubber* dan ditangkap hingga turun ke pengolahan *water scrubber*. Spesifikasi teknis dari insinerator yang digunakan disampaikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi insinerator

No	Parameter	Spesifikasi Teknis
1	Fungsi	Pengolahan Limbah B3
2	Waktu Pengoperasian	24 jam
3	Kapasitas	700 kg/jam
4	Desain	Smokeless, two chambers
5	Pengumpanan limbah	Manual
6	Sistem pengeluaran abu	Automatic ash banisher
7	Peralatan pengendali polusi udara	Cyclone dan Water Scrubber
8	Suhu operasional chamber 1	800-1.000 °C
9	Suhu operasional chamber 2	1.000-1.200 °C
10	Diameter cerobong	0,57 m

2.3 Analisis Data Uji Kinerja Proses Insinerator

Metode analisis data untuk menentukan uji kinerja proses insinerasi dan pengendalian pencemaran udara, yaitu:

- a. Mengetahui efisiensi pembakaran limbah B3 dalam insinerator dan waktu tinggal gas dalam insinerator. Efisiensi pembakaran (EP) ditentukan berdasarkan perbandingan kadar CO₂ dengan kadar CO dalam kondisi standar (P = 760 mmHg, T = 25 °C) setelah dikoreksi dengan oksigen 10%. Pengukuran CO₂ dan CO dengan gas analyzer pada cerobong dihitung dengan persamaan berikut:

$$EP = \frac{[CO]}{[CO_2]+[CO]} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- EP = Efisiensi pembakaran (%)
- CO₂ = Konsentrasi gas karbon dioksida yang terkoreksi dengan 10% oksigen (mg/Nm³)
- CO = Konsentrasi gas karbon monoksida yang terkoreksi dengan 10% oksigen (mg/Nm³)

- b. Waktu tinggal (*residence time*) gas merupakan waktu yang dibutuhkan oleh gas hasil pembakaran limbah B3 di ruang bakar insinerator. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021, waktu tinggal gas di ruang bakar ditentukan minimal dua detik. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$tR = \frac{V_{rb}}{Q_s \left(\frac{T_{rb}}{T_s}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- tR = Waktu tinggal gas (*residence time*), detik
- V_{rb} = Volume ruang bakar, m³
- Q_s = Laju alir gas dalam cerobong, m³/detik
- T_{rb} = Suhu absolut di ruang bakar, °K
- T_s = Suhu absolut di cerobong, °K

- c. Menghitung efisiensi penghancuran dan penghilangan (*destruction removal efficiency*, DRE)

limbah B3 dalam insinerator. DRE dirumuskan sebagai berikut:

$$DRE = \frac{W_{in}-W_{out}}{W_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- DRE = *Destruction removal efficiency* (efisiensi penghancuran dan penghilangan) (%)
- W_{in} = Konsentrasi *Tetrachloroethylene* (TCE) masuk ke insinerator (µg/L)
- W_{out} = Konsentrasi *Tetrachloroethylene* (TCE) keluar insinerator (µg/L)

- d. Mengetahui emisi udara yang dihasilkan oleh insinerator pada saat pembakaran limbah B3, meliputi:
 - 1) Penentuan partikel, dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Partikel = \frac{W}{VDGM} \times \frac{P_s}{760} \times \frac{298,15}{T_s} \times 1000 \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

- Partikel = Konsentrasi partikel (mg/Nm³)
- W = Bobot residu filter (g)
- VDGM = Volume *dry gas meter* (m³)
- P_s = Tekanan yang terukur (mmHg)
- T_s = Suhu terukur (°C)

- 2) Penentuan sulfur dioksida (SO₂), dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut:

$$SO_2 = \frac{SO_2 \text{ terukur} \times BM \ SO_2}{Volume \ gas \ standar} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

- MB = Berat molekul

- 3) Penentuan nitrogen dioksida (NO₂), dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$NO_2 = \frac{NO_2 \text{ terukur} \times BM \ NO_2}{Volume \ gas \ standar} \dots\dots\dots (6)$$

- 4) Penentuan hidrogen fluorida (HF), dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C = \frac{20}{19} \times \frac{(a-b) \times \frac{250}{20}}{V_s} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- C = Konsentrasi hidrogen fluorida (mg/Nm³)
- A = Jumlah ion fluorida yang didapat dari kurva kalibrasi (µg F-)
- B = Jumlah ion fluorida dalam larutan blanko (µg F-)
- V_s = volume contoh gas uji dikoreksi pada kondisi normal pada 25°C, 760 mmHg

- 5) Penentuan karbon monoksida (CO), dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$CO = \frac{CO \text{ terukur} \times BM \ CO}{Volume \ gas \ standar} \dots\dots\dots (8)$$

6) Penentuan hidrogen klorida (HCl), dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$C = \frac{(a-b) \times fp \times \frac{36,5}{35,5}}{V_s} \times 1000 \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- C = Konsentrasi hidrogen (mg/Nm³)
- A = Jumlah ion klorida dalam contoh uji yang didapat dari kurva kalibrasi (mg)
- B = Jumlah ion klorida dalam larutan blanko (mg)
- V_s = Volume contoh gas uji dikoreksi pada kondisi normal pada 25 °C, 760 mmHg,
- F_p = Faktor pengenceran

7) Penentuan total hidrokarbon sebagai CH₄, dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut:

$$CH_4 = \frac{CH_4 \text{ terukur} \times BM \text{ } CH_4}{Volume \text{ gas standar}} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

- CH₄ = Total hidrokarbon sebagai metana (mg/Nm³)
- CH₄ terukur = Total hidrokarbon sebagai metana terukur (ppm)
- BM CH₄ = Berat molekul (CH₄)

8) Penentuan logam berat yaitu Arsen (As), Kadmium (Cd), Kromium (Cr), Timbal (Pb), Merkuri (Hg), Thallium (Tl) menggunakan ICP MS dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Logam = \frac{Logam \text{ terukur} \times Volume \text{ sampel}}{Volume \text{ standar}} \dots\dots\dots (11)$$

9) Penentuan opasitas menggunakan skala ringelmann yang diamati langsung oleh petugas pengambil contoh uji.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efisiensi Pembakaran dan Waktu Tinggal

Efisiensi pembakaran (EP) ditentukan berdasarkan perbandingan kadar CO₂ dengan jumlah kadar CO₂ dan CO dalam kondisi standar (P = 760 mmHg, T = 25 °C) setelah dikoreksi dengan oksigen 10% (Wu *et al.*, 2021). Pengukuran efisiensi pembakaran berdasarkan komposisi gas CO₂ dan CO dilakukan pada beban pengumpanan 80% (500 kg/jam) dan 100% (700 kg/jam) dan dilakukan pula pengukuran blanko yaitu pengukuran komposisi gas CO₂ dan CO pada beban pengumpanan 0% (tanpa pengumpanan limbah B3). Hasil pengukuran pada kondisi ini dapat dianggap sebagai data dasar sehingga dapat digunakan sebagai pembandingan terhadap kondisi pengumpanan dengan beban limbah B3.

Tabel 3. Hasil efisiensi pembakaran

Umpan limbah	Run	CO Terukur (ppm)	CO ₂ terukur (%)	CO ₂ terukur mg/N (m ³)	O ₂ terukur (%)	CO (terkoreksi O ₂ 10%) (mg/Nm ³)	CO ₂ (terkoreksi O ₂ 10%) (mg/Nm ³)	Efisiensi Pembakaran (%)	Baku Mutu (%)
Blanko	Run 1	0,01	8,00	143967,28	9,51	0,010	137773,78	100,0000	
	Run 1	0,41	8,80	158364,01	8,24	0,353	136348,16	99,9997	
	Rerata	0,14	8,63	155304,70	7,94	0,123	131043,20	99,9999	≥ 99,99
80% (500 kg/jam)	Run 2	0,01	9,08	163402,86	6,40	0,008	122833,88	100,0000	
	Run 3	0,01	8,01	144147,24	9,17	0,009	133947,56	100,0000	
	Rerata	0,14	8,63	155304,70	7,94	0,123	131043,20	99,9999	≥ 99,99
100% (700 kg/jam)	Run 1	1,36	8,94	160883,44	8,02	1,151	136151,35	99,9992	
	Run 2	0,01	8,69	156384,46	8,53	0,009	137800,37	100,0000	
	Run 3	0,01	7,97	143427,40	9,45	0,010	136537,88	100,0000	
Rerata	0,46	8,53	153565,10	8,67	0,390	136829,87	99,9997		

Berdasarkan data di Tabel 3 dapat dilihat bahwa pada Run-1 kapasitas insinerator 80 dan 100% diperoleh hasil CO terkoreksi lebih besar dibandingkan Run-2 dan Run-3. Peningkatan kadar CO terkoreksi disebabkan oleh rendahnya kadar O₂ karena suplai udara ke ruang bakar kurang. Ketika dilakukan pengujian blanko, pasokan udara berlebih cukup karena tidak ada pengumpanan limbah yang dilakukan sehingga kadar CO rendah, namun ketika dilakukan pengumpanan limbah pada kapasitas 80 dan 100% pada Run-1 suplai udara kurang sehingga kadar CO tinggi. Setelah diperoleh hasil pada Run-1 bahwa kadar CO terkoreksi tinggi maka dilakukan penambahan pasokan udara berlebih pada ruang bakar, sehingga pada Run-2 dan Run-3, data pengukuran oksigen mengalami peningkatan

dan kadar CO terkoreksi menurun. Kadar CO terkoreksi juga berpengaruh pada nilai efisiensi pembakaran. Pada Tabel 3 tertera bahwa pada kadar CO terkoreksi tinggi, terjadi penurunan efisiensi pembakaran. Maka peningkatan atau penurunan kadar CO terkoreksi dan CO₂ terkoreksi sangat berpengaruh pada hasil efisiensi pembakaran (Hidayah, 2007). Pembakaran yang baik selalu membutuhkan komposisi yang tepat antara bahan bakar dan oksigen untuk menghasilkan produk berupa energi panas, CO, uap air, nitrogen, dan gas lain selain oksigen (Desiarista & Mirwan, 2019). Agar bahan bakar dapat terbakar secara sempurna, dibutuhkan jumlah udara yang lebih banyak dibandingkan dengan kondisi ideal dan jumlah udara berlebih atau sering dikenal dengan istilah

excess air (Xia *et al.*, 2022). Menurut Xia *et.al* (2022), untuk pembakaran dengan menggunakan bahan bakar solar, nilai *excess air* yang digunakan yaitu 10%, maka dilakukan koreksi dengan 10% oksigen pada perhitungan komposisi gas. Berdasarkan hasil pengukuran efisiensi pembakaran sesuai dengan Tabel 3, rerata hasil yaitu 99,9999% untuk beban pengumpanan 80% dan 99,9997% untuk beban pengumpanan 100%. Hal ini menunjukkan bahwa pembakaran berlangsung sempurna sehingga efisiensi pembakaran memenuhi baku mutu lingkungan yaitu lebih dari atau sama dengan 99,99%. Waktu tinggal gas adalah waktu yang dibutuhkan oleh gas hasil pembakaran limbah B3 di ruang bakar insinerator (Desiarista & Mirwan, 2019). Menurut Xia *et.al* (2022), waktu tinggal gas di ruang bakar ditentukan minimal 2 detik. Perhitungan waktu tinggal gas ditentukan dengan pengukuran volume ruang bakar (m³) yang umumnya adalah ruang bakar 2, dibagi dengan laju alir gas (m³/detik). Perhitungan waktu tinggal gas dilakukan pada beban pengumpanan 80 dan 100% pada pengukuran partikulat. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil perhitungan waktu tinggal gas dalam ruang bakar-2 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan waktu tinggal

Beban Limbah B3	Run	Waktu tinggal pada ruang bakar 2 (detik)	Baku Mutu (detik)
80% (500 kg/jam)	Run 1	6,27	> 2,00
	Run 2	5,42	> 2,00
	Run 3	6,47	> 2,00
	Rerata	6,05	> 2,00
100% (700 kg/jam)	Run 1	5,04	> 2,00
	Run 2	7,19	> 2,00
	Run 3	7,03	> 2,00
	Rerata	6,42	> 2,00

Pembakaran yang sempurna memerlukan waktu tinggal yang cukup untuk menjamin terjadinya pencampuran yang sempurna antara udara dan bahan bakar agar dapat bereaksi sempurna (Shen *et al.*, 2022). Dari hasil perhitungan waktu tinggal pada ruang bakar 2 pada pengukuran partikulat diperoleh hasil bahwa waktu tinggal melebihi dua detik, hal ini berarti hasil perhitungan waktu tinggal memenuhi baku mutu lingkungan sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 yaitu minimal dua detik. Waktu tinggal lebih dari dua detik mengindikasikan bahwa tidak ada senyawa *dioksin furan*, abu yang dihasilkan sedikit, serta terjadi pembakaran yang sempurna (Xia, *et.al*, 2022).

3.2 Hasil Efisiensi Penghancuran dan Penghilangan

Pada pengukuran efisiensi penghancuran dan penghilangan yang dibakar di insinerator adalah senyawa organik *Tetrachloroethylene* (TCE) yang telah diketahui konsentrasinya dengan beban pengumpanan 80 dan 100%.

Setelah dilakukan pengambilan sampel, kemudian TCE terjerap pada *tenax*, selanjutnya dianalisis di laboratorium menggunakan *gas chromatography mass spectrometry* (GC-MS). Spesifikasi *tenax* (absorber penjerap TCE) yaitu *sorbent tube, tenax ta* ukuran 16x125 mm, 1 *section*, 1,6 gm sorbent, dan 35/60 mash. Hasil pengukuran konsentrasi TCE sebelum diumpankan ke dalam insinerator dan konsentrasi TCE yang sudah dianalisis menggunakan GC-MS dibandingkan sehingga diperoleh DRE pada senyawa organik berbahaya TCE. Hasil perhitungan DRE dari proses pembakaran dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan nilai DRE

Beban Limbah B3	Run	Win (µg/L)	Wout (µg/L)	DRE (%)	Baku Mutu (%)
80% (500 kg/jam)	Run 1	1395	0,003	99,9998	≥ 99,99
	Run 2	1398	0,003	99,9998	
	Run 3	1417	0,003	99,9998	
	Rerata	1403	0,003	99,9998	
100% (700 kg/jam)	Run 1	1652	0,003	99,9998	≥ 99,99
	Run 2	1652	0,003	99,9998	
	Run 3	1347	0,003	99,9998	
	Rerata	1550	0,003	99,9998	

Berdasarkan hasil pengukuran TCE diperoleh rerata hasil yaitu 99,9998% untuk beban pengumpanan 80 dan 100%. Hal ini menunjukkan bahwa penghancuran dan penghilangan senyawa organik berbahaya setelah dibakar di insinerator dalam kondisi yang optimal ini dapat menghancurkan dan menghilangkan senyawa organik berbahaya hingga 99,9998% (Desiarista & Mirwan, 2019). Efisiensi penghancuran dan penghilangan yang diperoleh memenuhi baku mutu lingkungan sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 yaitu lebih dari atau sama dengan 99,99%.

3.3 Emisi Logam dan Partikulat dari Proses Pembakaran

Kandungan logam berat yang diemisikan dari cerobong insinerator disampling dan dianalisis dengan menggunakan (*inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS). Pengukuran laju alir gas dilakukan bersamaan dengan pengambilan contoh uji total partikulat dan logam berat (arsen, kromium, timbal, kadmium, talium, dan merkuri). Laju alir gas dihitung berdasarkan kecepatan linier gas yang diukur dengan tabung pitot tipe-S dikalikan dengan luas penampang cerobong insinerator. Laju alir gas insinerator diukur pada kondisi kosong atau tanpa pengumpanan limbah B3, dengan pengumpanan limbah B3 80 dan 100% serta untuk masing-masing beban tersebut dilakukan sebanyak 3 kali (ulangan). Tabel 6 menunjukkan hasil pengukuran dan perhitungan volume gas standar, suhu cerobong, kecepatan gas linier, laju alir gas, kadar O₂, nilai isokinetik, konsumsi bahan bakar, suhu ruang bakar, partikulat, dan logam berat (As, Cr, Pb, Ti dan Hg).

Tabel 6. Hasil pengukuran emisi logam dan partikulat dari pembakaran

Uraian	Blanko	500 kg/jam				700 kg/jam			
		Run 1	Run 2	Run 3	Rerata	Run 1	Run 2	Run 3	Rerata
Volume Gas Std, Vm(STD), m ³	0,9802	0,9464	1,1424	1,2634	1,1174	1,1409	0,8063	1,0459	0,9977
Suhu Cerobong, °C	187	215	256	228	233	252	206	225	228
Kecepatan Gas Linier, m/s	6,878	6,962	9,309	7,325	7,865	9,775	6,531	6,752	7,686
Laju Alir Gas @STD m ³ /jam, dry basis	3764	3615	4537	3750	3968	4707	3456	3408	3857
Kadar O ₂ , %	9,51	8,24	6,40	9,17	7,94	8,02	8,53	9,45	8,67
Nilai Isokinetik	101,95	99,22	100,45	102,11	100,59	102,26	101,96	97,71	100,64
Konsumsi Bahan Bakar L/jam	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Suhu Ruang Bakar I, °C	740	1038	1038	870	982	961	797	877	878
Suhu Ruang Bakar II, °C	915	976	976	1042	998	1128	955	1052	1045
Kadar Partikulat, mg/Nm ³	17,92	31,20	31,41	35,48	32,70	37,55	41,96	45,11	41,54
Arsen (As), mg/Nm ³	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Kromium (Cr), mg/Nm ³	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Timbal (Pb), mg/Nm ³	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Kadmium (Cd), mg/Nm ³	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Thalium (Tl), mg/Nm ³	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Merkuri (Hg), mg/Nm ³	< 0,0006	< 0,000	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006

Berdasarkan Tabel 6, pada Run-2 kapasitas 80% dan Run-1 kapasitas 100% terjadi peningkatan kecepatan gas linier. Hal ini disebabkan karena pada saat pengukuran terjadi penurunan tekanan yang disebabkan oleh gesekan fluida pada dinding cerobong. Penurunan tekanan sepanjang dinding cerobong akan berbanding lurus dengan kecepatan gas linier. Suhu ruang bakar 1 pada pengujian blanko yaitu 740 °C berbeda dengan suhu ruang bakar 1 pada kapasitas 80 dan 100% yang berada pada rentang 797–1038 °C. Pada pengoperasian pengolahan limbah dengan cara insinerasi, pengumpanan limbah akan dimulai pada saat suhu ruang bakar 1 mencapai 700 °C sehingga pengujian blanko dimulai ketika suhu ruang bakar 1 mencapai 700 °C. Pada Run-2 kapasitas 100% terjadi penurunan suhu ruang bakar 1 dikarenakan adanya pembuangan abu hasil insinerasi sehingga ada proses pembukaan ruang bakar 1 yang mengakibatkan suhu ruang bakar-1 menjadi turun hingga 797 °C.

Nilai isokinetik untuk pengambilan contoh uji total partikulat berkisar antara 97,71%–102,26%. Dengan demikian, nilai isokinetik yang diperoleh dari insinerator tersebut pada semua kondisi beban telah memenuhi persyaratan metode pengambilan contoh uji partikulat, yaitu dengan nilai isokinetik 100% ±10%. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kadar total partikulat dan kadar logam-logam yang terambil dengan peralatan pengambilan contoh uji ini telah mewakili terhadap kadar total partikulat dalam gas cerobong insinerator, karena nilai isokinetik terpenuhi berarti gas yang diemisikan ke luar cerobong dengan gas pada pengambilan contoh berada pada kecepatan alir yang sama. Jika persyaratan nilai isokinetik telah terpenuhi, maka partikulat yang terambil tersebut

selanjutnya dapat ditentukan secara gravimetri (Marosin, 2004).

Untuk membandingkan kadar total partikulat dan enam logam berat yang dihasilkan dari pengambilan contoh uji gas emisi cerobong insinerator, maka sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 harus dikoreksi pada kondisi normal (25° C, 760 mmHg), 10% Oksigen (O₂) dan berat kering. Parameter logam berat yang disampling dianalisis dengan menggunakan ICP MS. Hasil analisa menunjukkan bahwa semua parameter pengukuran di semua beban pengumpanan masih jauh di bawah baku mutu yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 kadar total partikulat harus dikoreksi pada kondisi normal (25 °C, 760 mmHg), 10% Oksigen (O₂) dan berat kering. Untuk nilai kadar partikulat pun pada semua kondisi beban pengumpanan berada di bawah nilai baku mutu emisi partikulat yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 yaitu 50 mg/Nm³ pada 25°C, 760 mmHg.

3.4 Emisi Gas HCl dan HF dari Proses Pembakaran

Gas hidrogen klorida (HCl) dan hidrogen fluorida (HF) yang diambil dari gas emisi cerobong insinerator dianalisis menggunakan spektrofotometer. Hasil pengujian yang diperoleh dikoreksi pada kondisi normal (25° C, 760 mmHg, berat kering), dengan koreksi kadar oksigen 10% sehingga dapat dibandingkan dengan nilai baku mutu emisi cerobong insinerator. Hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Emisi HCl dan HF dari proses pembakaran

Umpan limbah	Run	HCl (mg/Nm ³)	Baku mutu HCl (mg/Nm ³)	HF (mg/N m ³)	Baku mutu HF (mg/Nm ³)
0% (Blanko)	Run 1	< 0,5	70	< 0,5	10
	Run 1	34,10	70	6,94	10
80% (500 kg/jam)	Run 2	32,34	70	5,51	10
	Run 3	31,86	70	9,20	10
	Rerata	32,77	70	7,22	10
	Run 1	58,98	70	8,37	10
100% (700 kg/jam)	Run 2	61,39	70	9,01	10
	Run 3	63,90	70	8,70	10
	Rerata	61,42	70	8,69	10

Berdasarkan hasil pengujian emisi gas HCl dan HF dari insinerator yang diukur pada dua kondisi pengumpanan 80 dan 100% menunjukkan bahwa gas emisi HCl dan HF memenuhi nilai baku mutunya masing-masing berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi pencemaran parameter HCl dan HF pada proses insinerasi yang dilakukan, sehingga mengindikasikan bahwa insinerator tersebut masih beroperasi dengan baik (Xia *et al.*, 2022).

3.5 Emisi Gas NO_x, SO₂ dan CH₄ dari Proses Pembakaran

Gas-gas emisi insinerator yaitu nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂) dan total hidrokarbon yang dinyatakan sebagai metana (CH₄), diukur menggunakan *flue gas analyzer*. Pengukuran emisi gas-gas tersebut dilakukan bersamaan saat pengambilan contoh uji POHCs, HCl/HF, total partikulat dan logam-logam berat. Tabel 8 menunjukkan hasil pengukuran gas-gas emisi insinerator.

Tabel 8. Hasil pengukuran emisi gas NO_x, SO₂ dan CH₄

Umpan limbah	Run	NO _x (mg/Nm ³)	Baku mutu NO _x (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	Baku mutu SO ₂ (mg/Nm ³)	CH ₄ (mg/Nm ³)	Baku mutu CH ₄ (mg/Nm ³)
0% (Blanko)	Run 1	8,00	250	2,70	300	< 0,7	35
	Run 1	5,60	250	4,21	300	< 0,7	35
80% (500 kg/jam)	Run 2	6,10	250	3,76	300	< 0,7	35
	Run 3	6,70	250	4,28	300	< 0,7	35
	Rerata	6,13	250	4,08	300	< 0,7	35
	Run 1	15,00	250	4,73	300	< 0,7	35
100% (700 kg/jam)	Run 2	16,10	250	4,36	300	< 0,7	35
	Run 3	17,10	250	4,66	300	< 0,7	35
	Rerata	16,07	250	4,58	300	< 0,7	35

Berdasarkan Tabel 8, nilai rerata NO_x pada beban pengumpanan 80 dan 100% yang paling besar adalah pada kondisi beban 100% dan yang paling kecil adalah pada kondisi 80%. NO_x dapat dihasilkan dari proses pembakaran gas N₂ pada suhu tinggi dengan O₂ pada komposisi yang sesuai (Marosin, 2004). Komposisi gas N₂ di udara bebas sebesar 78%, oleh karena itu walaupun pada kondisi pembakaran tanpa pengumpan limbah (0%) masih terdapat emisi gas NO_x yang dihasilkan akibat dari udara yang dibakar (Jin *et al.*, 2022). Untuk hasil NO_x yang dihasilkan pada kondisi 80% lebih kecil karena konsumsi O₂ tidak seluruhnya terpakai untuk membakar gas N₂, sebagian bereaksi untuk menguraikan zat lain yang terkandung dalam beban limbah yang dimasukkan (Xia *et al.*, 2022).

Hasil pengukuran SO₂ untuk beban pengumpan yang sama cenderung stabil, namun bila dibandingkan dengan jumlah limbah, pengumpanan limbah dengan beban 100%

dari kapasitas, lebih tinggi dibandingkan dengan pada saat beban pengumpan 80% dari kapasitas. Hal ini terjadi karena SO₂ yang terbentuk dominan berasal dari konsumsi bahan bakar. Sulfur merupakan salah satu komponen yang terkandung dalam bahan bakar solar dengan presentasi 0,05% (Dirjen Minyak dan Gas Bumi, 2017). Berdasarkan hal tersebut semakin banyak limbah yang akan dibakar maka semakin banyak pula bahan bakar yang dikonsumsi untuk mencapai pembakaran sempurna sehingga persentase limbah yang dibakar akan berbanding lurus dengan gas SO₂ yang dihasilkan (Jiang & Wang, 2022).

Hasil pengukuran gas metana (CH₄) di bawah limit deteksi pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung sempurna sehingga tidak ada hasil pirolisis zat organik dari proses pembakaran yang tersisa (Wu *et al.*, 2021). Hal ini selaras dengan hasil efisiensi pembakaran yaitu 99,99%. Berdasarkan hasil pengukuran

gas-gas emisi yaitu NO_x, SO₂, dan CH₄ semuanya memenuhi baku mutu lingkungan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021.

3.6 Pengukuran Opasitas

Pengukuran opasitas emisi tiga cerobong insinerator dilakukan dengan menggunakan acuan metode SNI 19-7117.11-2005 yang menghasilkan nilai opasitas < 10%. Tabel 9 menunjukkan hasil pengukuran opasitas.

Tabel 9. Hasil pengukuran opasitas

Opasitas	Run-1 (%)	Run-2 (%)	Run-3 (%)	Baku Mutu (%)
0% (Tanpa Beban)	< 10	< 10	< 10	20
80% (500 kg/jam)	< 10	< 10	< 10	20
100% (700 kg/jam)	< 10	< 10	< 10	20

Asap timbul sebagai indikasi dari proses pembakaran yang tidak sempurna, hasil pengukuran opasitas pada beban pengumpanan 80 dan 100% seluruhnya berada di bawah skala Ringlemann terkecil yakni < 10%. Hal tersebut menunjukkan proses pembakaran yang sempurna pada ketiga kondisi karena tidak adanya kepulan asap tebal yang terbentuk selama proses pembakaran berlangsung (Desiarista & Mirwan, 2019). Jika hasil pengukuran opasitas dibandingkan dengan nilai baku mutu lingkungan berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan hidup dan Kehutanan No: 6 Tahun 2021, yaitu 10%, maka opasitas cerobong insinerator telah memenuhi persyaratan baku mutu emisi untuk opasitas. Dengan demikian, hasil pengukuran opasitas tersebut telah membuktikan kesesuaian dengan desain spesifikasi.

4. KESIMPULAN

Insinerator dengan tipe CRE-500 yang digunakan untuk pengolah limbah B3 industri dan medis di pusat pengolahan limbah B3 masih memiliki kinerja yang optimal (sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021) untuk pembakaran limbah B3 dengan jumlah pengumpan hingga 100% kapasitas ruang pembakaran. Kinerja optimal di tunjukkan oleh efisiensi pembakaran yang mencapai 99,9997% pada pembakaran limbah B3 dengan beban 100%. Efisiensi pembakaran ini menunjukkan bahwa tidak ada gas-gas pirolisis yang berbahaya yang teremisikan ke lingkungan. Rerata waktu tinggal untuk beban pengumpanan 80% (500kg/jam) adalah 6,05 detik sedangkan untuk beban pengumpanan 100% (700 kg/jam) adalah 6,42 detik. Hal ini berarti insinerator dalam kondisi optimal mampu membakar limbah B3. Efisiensi penghancuran dan penghilangan (*destruction removal efficiency*, DRE) dengan beban pengumpan 100% adalah 99,9998% sehingga insinerator dalam kondisi optimal mampu menghancurkan dan menghilangkan senyawa organik berbahaya pada limbah B3. Kualitas emisi yang diukur dari parameter partikulat, komposisi. gas, logam berat (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Tl) dan opasitas yang dihasilkan oleh cerobong insinerator semuanya memenuhi baku mutu lingkungan berdasarkan

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 sehingga tidak ada senyawa berbahaya yang teremisikan ke lingkungan.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sahid yang telah memfasilitasi penelitian yang menjadi dasar penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Chandra, H., Rahmania, R., Kusumaningrum, P. D., Sianturi, D. S. A., Firdaus, Y., Sufyan, A., Hatori, C. A., Akhwady, R., Indriasari, V. Y., Triwibowo, H., & Marzuki, M. I. (2021). Developing the Debris Insinerator Vessel as a New Solution for Managing Marine Debris in Small Islands of Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 925(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012016>.

Chen, T. L., Kim, H., Pan, S. Y., Tseng, P. C., Lin, Y. P., & Chiang, P. C. (2020). Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, 716(1), 136998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>

Desiarista, A., & Mirwan, M. (2019). Peningkatan Kinerja Insinerator Sampah Medis Berdasarkan Waktu dan Suhu Pembakaran. *Jurnal Purifikasi*, 19(1), 1–8

Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management systems to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>

Hidayah, E. N. (2007). Uji Kemampuan Pengoperasian Insinerator Untuk Mereduksi Imbah Klinik Rumah Sakit Umum Haji Surabaya. *Jurnal Rekayasa Perencanaan, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik UPN "Veteran" Jatim, Surabaya*, 4.

Jiang, X., & Wang, F. (2022). Experimental study and reaction mechanism on the process of Br addition for mercury emission control. *Chemical Engineering Journal*, 435(P1), 134776. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134776>

Jin, Q., Xu, M., Lu, Y., Yang, B., Ji, W., Xue, Z., Dai, Y., Wang, Y., Shen, Y., & Xu, H. (2022). Simultaneous catalytic removal of NO, mercury and chlorobenzene over WCeMnOx/TiO₂-ZrO₂: Performance study of microscopic morphology and phase composition. *Chemosphere*, 295(October 2021), 133794. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere>

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2017). Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar

- Minyak Jenis Bensin 90 yang Dipasarkan di Dalam Negeri. Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor: 0486.K/10/DJM.S/2017. Jakarta
- Nguyen, M. H., & Huynh, T. P. (2022). Turning incinerator waste fly ash into interlocking concrete bricks for sustainable development. *Construction and Building materials*, 321(September 2021), 126385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126385>
- Marosin, R. (2004). Karakteristik Emisi Gas Buang Insinerator Medis Dirumah Sakit Jiwa Dadi Makassar Sulawesi Selatan. 5(1), 1-6
- Ochoa, G. V., Gutierrez, J. C., & Forero, J. D. (2020). Exergy, economic, and life-cycle assessment of ORC system for waste heat recovery in a natural gas internal combustion engine. *Resources*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/resources9010002>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No: 6 Tahun 2021 Tentang Tatacara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah B3, Lampiran XIV: Bakumutu Emisi Pengolahan Limbah B3 dengan Cara Termal Melalui Insinerasi
- Shen, W., Zhu, N., Xi, Y., Huang, J., Li, F., Wu, P., & Dang, Z. (2022). Effects of medical waste incineration fly ash on the promotion of heavy metal chlorination volatilization from incineration residues. *Journal of Hazardous Materials*, 425(September 2021), 128037. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128037>
- Standar Nasional Indonesia. (2005). Emisi Gas Buang Sumber Tidak Bergerak-Bagian 8: Cara Uji Kadar Hidrogen Klorida (HCl) dengan Metode Merkuri Tiosianat menggunakan Spektrofotometer. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional SNI No.19-7117.8-2005
- Standar Nasional Indonesia. (2005). Emisi Gas Buang Sumber Tidak Bergerak-Bagian 9: Cara Uji Kadar Hidrogen Fluorida (HF) dengan Metode Kompleks Lanthanum Alizarin menggunakan Spektrofotometer. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional SNI No. 19-7117.9-2005
- Standar Nasional Indonesia. (2005). Emisi Gas Buang Sumber Tidak Bergerak-Bagian 10: Cara Uji Konsentrasi CO, CO₂, dan O₂ dengan peralatan analisis otomatis. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional. SNI No. 19-7117.10-2005.
- Standar Nasional Indonesia. (2005). Emisi Gas Buang Sumber Tidak Bergerak-Bagian 11: Cara Uji Opasitas menggunakan Skala Ringelmann untuk asap hitam. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional SNI No. 19-7117.11-2005
- USEPA. (2020). Method 1 04/28/2020. 1-12
- Wang, P., Yan, F., Cai, J., Xie, F., Shen, X., Wei, X., Yang, G., Zhong, R., Huang, J., Li, Z., & Zhang, Z. (2022). Emission levels and phase distributions of PCDD/Fs in a full-scale municipal solid waste incinerator: The impact of wet scrubber system. *Journal of Cleaner Production*, 337(September 2021), 130468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130468>
- Wu, D., Li, Q., Shang, X., Liang, Y., Ding, X., Sun, H., Li, S., Wang, S., Chen, Y., & Chen, J. (2021). Commodity plastic burning as a source of inhaled toxic aerosols. *Journal of Hazardous Materials*, 416(March). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125820>
- Xia, H., Tang, J., & Aljerf, L. (2022). Dioxin emission prediction based on improved deep forest regression for municipal solid waste incineration process. *Chemosphere*, 294(September 2021), 133716. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133716>