

Analisis Optimasi Pembakaran Sekunder dan Dispersi Emisi Berbasis AERMOD di Insinerator Plant, Dawuan Tengah, Kabupaten Karawang

Didin Agustian Permadi, Alimah Himmawati*

Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

*Koresponden email: alimahhimmawati@gmail.com

Diterima: 4 Agustus 2026

Disetujui: 12 Agustus 2026

Abstract

The increasing generation of medical hazardous waste requires treatment technologies that capable of effectively destroying waste while minimizing air pollutant emissions. This study aims to evaluate the effect of secondary combustion chamber temperature on flue gas and particulate emissions and to model the atmospheric dispersion of emissions from a medical waste incinerator using AERMOD software at PT. Jasa Medivest, Dawuan Tengah, Karawang Regency. A quantitative approach was employed using primary data consisting of combustion chamber temperature, continuous emission monitoring system (CEMS) data, and stack emission measurements, supported by secondary data including meteorological conditions and stack characteristic. Secondary chamber temperatures of 600°C, 800°C and 1000°C were evaluated. Dispersion modeling was performed using AERMOD with meteorological data processed by AERMET and terrain data processed by AERMAP. The result indicate that increasing the secondary combustion temperature improves combustion efficiency, as reflected by lower CO and particulate emissions, whereas NO₂ emission tend to increase due to thermal NO_x formation at elevated temperatures. AERMOD simulations showed that predicted SO₂, NO₂, and particulate concentrations at all receptor locations complied with the ambient air quality standards stipulated in Government Regulation No 22 Of 2021. Model validation using Root Mean Square Percent Error (RMSPE) demonstrated a good agreement between simulated and observed data. Overall, appropriate control of the secondary combustion chamber temperature contributes to compliance with emission standards and ambient air quality regulations.

Keywords: *medical waste incinerator, secondary combustion, temperature, gas emission, aermod*

Abstrak

Peningkatan jumlah limbah B3 medis memerlukan teknologi pengolahan yang mampu memusnahkan limbah secara efektif serta memenuhi ketentuan baku mutu emisi dan kualitas udara ambien. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur ruang bakar sekunder terhadap karakteristik emisi gas buang serta memodelkan dispersi emisi insinerator limbah medis menggunakan AERMOD di PT. Jasa Medivest, Dawuan Tengah, Kabupaten Karawang. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data temperatur ruang bakar, pemantauan emisi cerobong, data meteorologi, serta karakteristik sumber emisi. Pemodelan dispersi dilakukan menggunakan perangkat lunak AERMOD dengan menggunakan data meteorologi yang diolah melalui AERMET dan data topografi melalui AERMAP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur ruang bakar sekunder meningkatkan efisiensi pembakaran yang ditandai dengan penurunan konsentrasi CO dan partikulat sedangkan konsentrasi NO₂ cenderung meningkat akibat pembentukan termal NO_x pada temperatur tinggi. Hasil simulasi dispersi menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂, NO₂, dan partikulat pada seluruh titik reseptor masih berada di bawah baku mutu udara ambien berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021. Hasil validasi model menggunakan metode *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE) menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan data pengukuran aktual. Secara keseluruhan pengendalian temperatur ruang bakar sekunder berperan penting dalam mendukung kepatuhan terhadap baku mutu emisi dan kualitas udara ambien.

Kata Kunci: *insinerator limbah medis, pembakaran sekunder, temperatur, emisi gas, aermod*

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah fasilitas pelayanan kesehatan berbanding lurus dengan meningkatnya timbulan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) medis yang memerlukan pengelolaan secara aman untuk mencegah penyebaran penyakit maupun pencemaran lingkungan. Limbah medis infeksius, patologis,

farmasi dan benda tajam yang mengandung mikroorganisme patogen serta senyawa kimia berbahaya sehingga tidak dapat dikelola bersamaan dengan limbah domestik [1]. Salah satu teknologi yang masih banyak digunakan untuk pengolahan limbah B3 medis adalah insinerasi karena mampu mereduksi volume limbah hingga lebih dari 90%, menonaktifkan mikroorganisme patogen serta menghancurkan senyawa organik berbahaya dalam waktu yang relatif singkat. Meskipun demikian proses insinerasi berpotensi menghasilkan emisi gas buang yang mengandung karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), partikulat, logam berat, serta senyawa organik persisten seperti dioksin dan furan apabila kondisi pembakaran tidak berlangsung secara optimal [1].

Optimasi temperatur pada ruang bakar sekunder menjadi kunci dalam menekan emisi yang dihasilkan, karena suhu tinggi yang stabil memungkinkan pembakaran sempurna dari senyawa organik berbahaya. Pemantauan efektivitas sistem tersebut perlu didukung oleh pemodelan sebaran emisi ke lingkungan sekitar. AERMOD merupakan perangkat lunak yang umum digunakan untuk memprediksi penyebaran polutan dari sumber titik seperti cerobong insinerator [3]. Selain itu, pengendalian emisi pada insinerator modern juga didukung oleh *Air Pollution Control Device* (APCDs) seperti *venturi scrubber*, *bag filter* dan *dry scrubber*. Kombinasi sistem pembakaran yang baik dengan APCD yang efektif terbukti mampu menurunkan emisi partikulat, gas asam, logam berat serta senyawa organik persisten sebelum gas buang dilepaskan ke atmosfer [3]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan sistem scrubbing dan filtrasi yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pengendalian polutan dan membantu fasilitas insinerasi yang dapat memenuhi baku mutu emisi yang telah ditetapkan regulator [9].

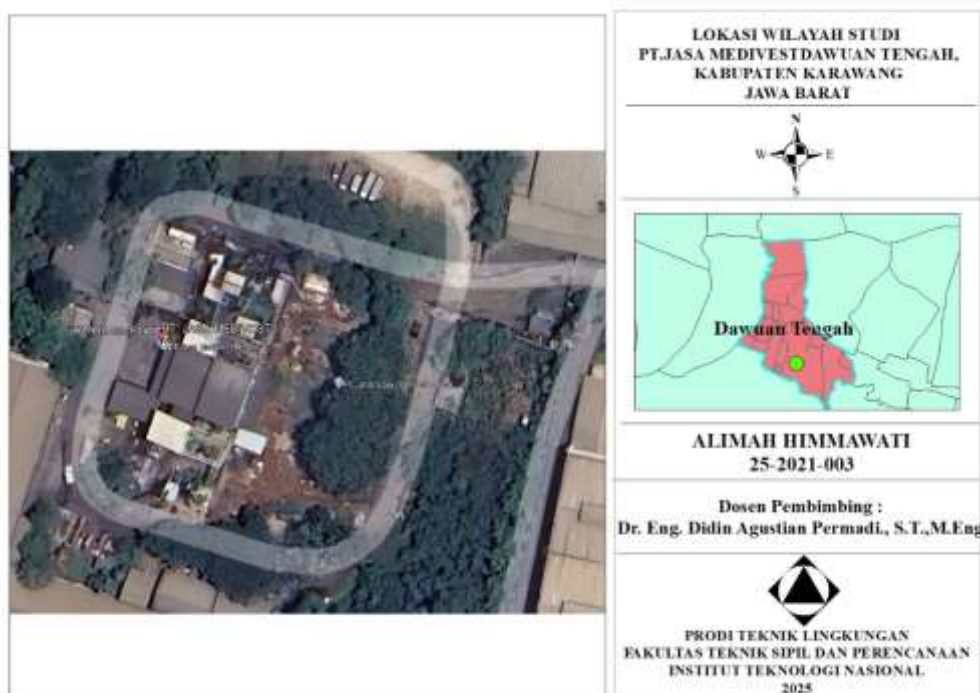
Evaluasi terhadap emisi insinerator tidak hanya dilakukan pada cerobong, tetapi juga perlu mempertimbangkan dampaknya terhadap kualitas udara ambien di sekitar fasilitas. Konsentrasi polutan yang keluar dari cerobong akan mengalami proses dispersi yang dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, karakteristik cerobong, topografi dan stabilitas atmosfer. Oleh karena itu pemodelan dispersi menjadi pendekatan yang banyak digunakan untuk memprediksi distribusi konsentrasi polutan di lingkungan serta mengevaluasi dampaknya terhadap masyarakat. Salah satu model yang direkomendasikan oleh *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) adalah AERMOD, yang dinilai mampu memodelkan dispersi polutan dari sumber titik dengan mempertimbangkan karakteristik atmosfer dan kondisi permukaan secara rinci [2].

Berdasarkan kondisi tersebut penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur ruang bakar sekunder terhadap karakteristik emisi gas buang insinerator limbah medis serta mengevaluasi pola dispersi emisi menggunakan perangkat lunak AERMOD pada fasilitas pengolahan limbah B3 medis di PT. Jasa Medivest, Dawuan Tengah, Kabupaten Karawang. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh kondisi operasi pembakaran terhadap karakteristik emisi dan sebaran polutan di udara ambien, serta menjadi masukan dalam upaya peningkatan kinerja operasional insinerator dan pemenuhan ketentuan baku mutu emisi maupun kualitas udara ambien.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan di unit insinerator medis PT. Jasa Medivest yang berlokasi di Kawasan Industri, Dawuan Tengah, Kabupaten Karawang (**Gambar 1**). Objek penelitian ini adalah dua unit insinerator medis dengan 2 ruang pembakaran yaitu *primary* and *secondary chamber combustion* dengan kapasitas masing masing insinerator 12 ton/ hari yang telah dilengkapi dengan sistem pemantauan emisi berbasis CEMS. Proses pembakaran berlangsung pada *primary chamber* 800°C untuk menguraikan komponen organik kemudian dilanjutkan *secondary chamber* 850°C-1000°C untuk menyempurnakan oksidasi gas sisa pembakaran sebelum dilepaskan melalui cerobong.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Sumber: Hasil Pemetaan, 2025

2.2 Pengumpulan Data

Data primer meliputi temperatur ruang bakar primer dan sekunder serta konsentrasi emisi real time (CO, NO_x, SO₂ & partikulat) dari CEMS, yang diambil pada tiga periode operasional harian yaitu pagi (07.00-11.00), siang (13.00-17.00) dan sore (18.00-23.00) mengikuti ketentuan durasi sampling minimal 1 jam pada PP NO 22 Tahun 2021 Lampiran VII. Data sekunder terdiri atas dokumentasi operasional insinerator, peraturan yang diacu serta data meteorologi seperti arah dan kecepatan angin per jam untuk periode penelitian Agustus-September 2025 yang diperoleh dari data meteorologi global seperti ERA5 melalui portal *Copernicus Climate Data Store* (CDS).

2.3 Variasi Temperatur Ruang Bakar Sekunder

Pengaruh temperatur ruang bakar sekunder terhadap emisi dianalisis pada tiga kondisi operasi yaitu 600°C, 800°C, dan 1000°C. Untuk dua unit insinerator yang memiliki spesifikasi dan karakteristik operasi sama, parameter yang dibandingkan melalui konsentrasi CO, NO_x, SO₂ dan partikulat pada masing-masing kondisi temperatur.

2.4 Pemodelan Dispersi dengan AERMOD

Data konsentrasi emisi hasil pemantauan CEMS pada masing-masing variasi temperatur digunakan sebagai data masukan (input) point source dalam pemodelan AERMOD yang menggunakan pendekatan steady-state Gaussian Plume dengan mempertimbangkan data meteorologi serta topografi lokasi penelitian. Karena kedua insinerator menunjukkan pola dispersi yang relatif sama pemodelan dilakukan hanya pada satu unit insinerator saja sebagai representasi kedua insinerator. Simulasi dilakukan pada area domain 10 km x 10 km untuk periode 1 jam, 24 jam dan bulanan kemudian dibandingkan terhadap baku mutu udara ambien dengan PP NO 22 Tahun 2021, Lampiran VII.

2.5 Validasi Model

Validasi model AERMOD dilakukan dengan metode *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE) yaitu dengan cara membandingkan konsentrasi hasil pemodelan (St) dengan konsentrasi pengukuran aktual (At) pada titik reseptor yang sama dengan persamaan:

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(s_i - o_i)^2}{o_i}} \times 100\%$$

Nilai RMSPE <25% dikategorikan dapat diterima (*acceptable*) dan <10% dikategorikan baik (*good*) [4]. Sebelum validasi, dilakukan kalibrasi parameter land use pada AERMET (*albedo*, *bowen ratio* dan *surface roughness*) untuk tiga sektor tutupan lahan di sekitar lokasi penelitian agar merepresentasikan kondisi aktual lapangan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Temperatur Ruang Bakar Sekunder Terhadap Emisi

Peningkatan temperatur ruang bakar sekunder dari 600°C ke 1000°C secara konsisten menurunkan konsentrasi CO dan partikulat pada kedua insinerator (**Tabel 1**), karena suhu yang lebih tinggi meningkatkan efisiensi oksidasi sehingga senyawa organik dan partikel karbon terbakar lebih sempurna. Pada insinerator 1, konsentrasi CO menurun dari 120 mg/Nm³ pada temperatur 600°C menjadi 20 mg/Nm³ pada temperatur 1000°C, sementara partikulat menurun dari 45 mg/Nm³ menjadi 12 mg/Nm³. Namun sebaliknya konsentrasi NO_x meningkat dari 80 mg/Nm³ menjadi 110 mg/Nm³ akibat mekanisme termal NO_x/Zeldovich dimana reaksi termal antara nitrogen dan oksigen udara meningkat pada suhu tinggi, sejalan dengan temuan [5][6]. Konsentrasi SO₂ relatif stabil pada seluruh variasi temperatur karena lebih ditentukan oleh kadar sulfur dalam limbah dibandingkan kondisi termal. Kedua insinerator menunjukkan pola perubahan emisi yang serupa, sehingga rentang temperatur 800^o-1000^oC dapat direkomendasikan sebagai kondisi operasi optimal yang menyeimbangkan penurunan CO dan partikulat dengan pengendalian kenaikan NO_x.

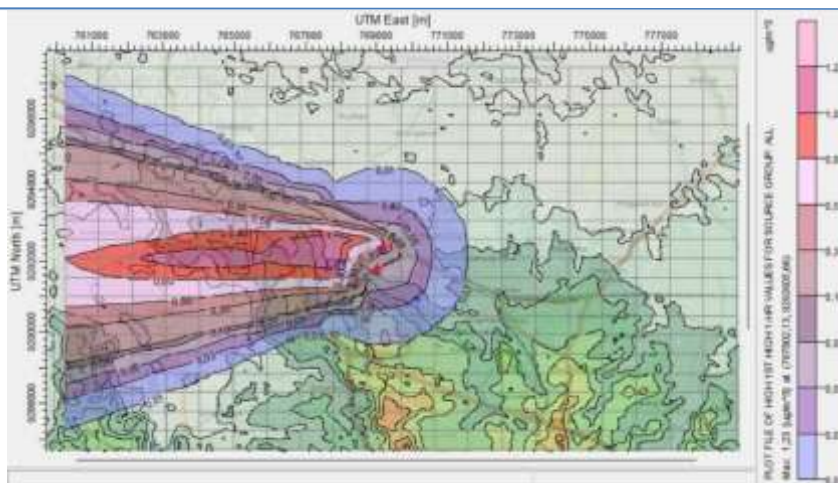
Tabel 1. Konsentrasi Emisi pada Variasi Temperatur Ruang Bakar Sekunder

Insinerator	Temperatur (°C)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	Partikulat (mg/Nm ³)
1	600	120	80	40	45
1	800	55	95	42	25
1	1000	20	110	43	12
2	600	118	79	41	42
2	800	57	99	39	22
2	1000	18	107	38	10

Sumber: Hasil Analisis, 2025

3.2 Pola Dispersi Emisi Berdasarkan Simulasi AERMOD

Hasil simulasi AERMOD menunjukkan pola sebaran polutan berbentuk isopleth elips yang memanjang mengikuti arah angin dominan wilayah Dawuan Tengah, yaitu menuju barat ke barat laut. Sebagai ilustrasi dispersi SO₂ periode 1 jam (**Gambar 3**) menunjukkan nilai puncak sekitar 1,05 µg/m³ pada zona dekat downwind dari cerobong. Dengan pola melingkar (*annular*) di sekitar titik sumber akibat plume yang masih terangkat oleh tinggi efektif cerobong. Nilai maksimum menurun menjadi sekitar 0,50 µg/m³ pada periode 24 jam dan 0,47 µg/m³ pada periode bulanan. Karena agregasi waktu yang lebih panjang meratakan fluktuasi puncak jam namun memperluas area sebaran konsentrasi rendah. Pola serupa juga terbentuk pada dispersi NO₂ dan partikulat (TSP), dengan konsentrasi tertinggi konsisten berada pada sumbu downwind utama dan menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber sejalan dengan karakteristik plume rise dan stabilitas atmosfer pada model gaussian plume [2][7].



Gambar 2. Hasil Pemodelan Dispersi Konsentrasi SO₂ Periode 1 jam
Sumber : Hasil Analisis, 2025

3.3 Validasi Model AERMOD

Validasi model menggunakan metode RMSPE pada lima titik reseptor menghasilkan nilai kesalahan sebesar 11,95% untuk SO₂ 1,29% untuk NO₂ dan 0,28% untuk partikulat (**Tabel 2**). Seluruh nilai RMSPE berada jauh di bawah ambang batas 25% untuk kategori *acceptable*, bahkan untuk hasil NO₂ dan partikulat berada di 10% masuk dalam kategori *good/excellent*. Hal ini, menunjukkan bahwa konfigurasi model, data meteorologi ERA 5 dan parameter *land use* hasil kalibrasi (*albedo, bowen ratio* dan *surface roughness*) telah cukup representatif terhadap kondisi aktual di lokasi penelitian sehingga hasil pemodelan AERMOD dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kualitas udara di sekitar fasilitas.

Tabel 2. Hasil Validasi Model AERMOD dengan metode RMSPE

Parameter	Jumlah Titik Reseptor	RMSPE (%)	Kriteria
SO ₂ (1 jam)	5	11,95	Valid (acceptable, 10-25%)
NO ₂ (1 jam)	5	1,29	Valid (good, <10%)
Partikulat/TSP (1 jam)	5	0,28	Valid (excellent, <10%)

Sumber: Hasil Analisis, 2025

3.4 Kepatuhan Terhadap Baku Mutu

Hasil pengukuran aktual emisi cerobong insinerator menunjukkan bahwa seluruh parameter utama masih berada jauh di bawah baku mutu emisi yang diacu yaitu permenLHK No 70 Tahun 2016 (**Tabel 3**). Konsentrasi partikulat sebesar 20,57 mg/Nm³ sementara SO₂, NO_x, CO dan partikulat masih memenuhi ketentuan. Untuk hasil pemantauan kualitas udara ambien pada berbagai waktu (pagi, sore dan malam) dan berdasarkan titik sampling menunjukkan bahwa konsentrasi SO₂, NO₂, CO dan partikulat berada di bawah baku mutu udara ambien PP No 22 Tahun 2021, konsisten dengan hasil simulasi AERMOD yang memprediksi konsentrasi ambien rendah di area fasilitas. Dengan demikian, operasi insinerator PT. Jasa Medivest pada rentang temperatur optimum dinilai patuh terhadap ketentuan baku mutu emisi maupun baku mutu udara ambien yang berlaku.

Tabel 3. Perbandingan Konsentrasi Emisi Aktual dengan Baku Mutu Emisi

Parameter	Baku Mutu (mg/Nm ³)	Konsentrasi Aktual (mg/Nm ³)	Keterangan
Partikulat	120	20,57	Memenuhi
SO ₂	210	72,63	Memenuhi
NO _x	470	≈70	Memenuhi
CO	625	65,31	Memenuhi
HCl	10	6,35	Memenuhi
HF	2	<1,17	Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis, 2025

4. Kesimpulan

Variasi temperature ruang bakar sekunder 600°C, 800°C dan 1000°C, berpengaruh signifikan terhadap karakteristik emisi gas buang dan partikulat pada insinerator limbah B3 medis PT. Jasa Medivest. Peningkatan temperatur menurunkan konsentrasi CO dan partikulat secara konsisten melalui korelasi negatif namun meningkatkan konsentrasi NO_x melalui korelasi positif akibat pembentukan thermal NO_x, sehingga pada rentang 800°C-1000°C merupakan kondisi paling ideal karena memberikan kesetimbangan terbaik antara penurunan CO dan partikulat dengan kenaikan NO_x yang masih terkendali. Interaksi antara temperatur dan residence time gas buang turut mempengaruhi pembentukan NO_x, sehingga pengendalian suhu dan waktu tinggal secara simultan penting untuk menekan emisi tersebut.

Pemodelan dispersi menggunakan AERMOD menunjukkan bahwa sebaran emisi gas dan partikulat dari cerobong mengikuti arah, dan partikulat dari cerobong mengikuti arah dan kecepatan angin dominan menuju barat-barat laut dengan pola *isopleth elips* yang konsentrasinya menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber. Untuk validasi model dengan metode RMSPE menghasilkan tingkat kesesuaian yang baik hingga sangat baik (SO₂ 11,95%, NO₂ 1,29%, Partikulat 0,28%), yang mengonfirmasi keandalan model dalam merepresentasikan kondisi dispersi aktual. Seluruh hasil pengukuran emisi cerobong dan kualitas udara ambien masih memenuhi baku mutu emisi permen LHK No 70 Tahun 2016 dan Baku mutu udara ambien yaitu PP No 22 Tahun 2021, sehingga kinerja lingkungan operasi insinerator PT. Jasa Medivest pada rentang temperatur optimum dinilai layak. Optimalisasi lebih lanjut disarankan melalui penguatan sistem air pollution control device, integrasi CEMS dengan sistem advance, serta pengolahan residu *bottom ash* dan *fly ash* melalui proses stabilisasi/ solidifikasi sesuai konsep *resource recovery*.

5. Daftar Pustaka

- [1] Nematollahi, H., Tuysserkani, M., & Nematollahi, A., "Medical waste management in the modern healthcare era: A comprehensive review of technologies, environmental impact, and sustainable practices," *Results in Engineering*, vol. 28, pp. 107210, 2025.
- [2] Cimorelli, A. J., Perry, S. G., & Venkatram, A., "AERMOD: Description of Model Formulation," *U.S. Environmental Protection Agency*, 2018.
- [3] Di Maria, F., Sisani, F., Cesari, D., & Bontempi, E., "Supporting the investigation of health outcomes due to airborne emission by different approaches: current evidence for the waste incineration sector," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, pp. 58527–58540, 2024.
- [4] Li, J., & Zhang, F., "Cloud fraction effects on AERMOD-predicted dispersion from waste incineration facilities," *Environmental Modeling and Assessment*, vol. 27(6), pp. 1039–1051, 2022.
- [5] Zheng, M., Sun, J., Gong, L., Fan, Y., Tu, J., & Dong, J., "Optimization of secondary air operation parameters of waste incineration boiler based on response surface methodology," *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, pp. 121763, 2024.
- [6] Perry, S. G., Cimorelli, A. J., & Paine, R. J., "Boundary layer formulation in AERMOD," *Atmospheric Environment*, vol. 200, pp. 124–135, 2019.
- [7] Taghilou, S., Torkashvand, J., Kermani, M., & Farzadkia, M., "Incineration of medical waste: emission of pollutants into the environment," *Journal of Air Pollution and Health*, vol. 6(4), pp. 287–334, 2021.
- [8] Shaik, S. R., Mahalingam, A. K., & Palanisamy, M., "Comprehensive review on medical waste incineration," *International Journal of Global Warming*, vol. 27(1), pp. 16–45, 2022.
- [9] Adu, R. O., Gyasi, S. F., Essumang, D. K., & Adu-Gyamfi, S., "Design and construction of a gas filter system for hospital incinerators," *Environmental Challenges*, vol. 9, pp. 100651, 2022.
- [10] USEPA, "AERMOD Model Formulation and Evaluation: Influence of Meteorological Parameters," *U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards*, 2023.
- [11] Zhang, L., & Wang, H., "Wet and dry deposition modeling of pollutants emitted from waste incineration plants," *Journal of Environmental Management*, vol. 297, pp. 113387, 2021.
- [12] Han, X., Zhang, H., & Liu, Y., "Impacts of barometric pressure and stability on plume behavior from waste incineration facilities," *Atmospheric Environment*, vol. 285, pp. 119243, 2022.
- [13] Guo, Y., Chen, J., & Li, S., "Influence of cloud cover and solar insolation on atmospheric stability and pollutant dispersion," *Atmospheric Environment*, vol. 262, pp. 118625, 2021.
- [14] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri LHK No. P.56/Menlhk-Setjen/2015 tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengelolaan Limbah B3 dari Fasilitas Pelayanan Kesehatan," *KLHK*, 2015.

-
- [15] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, “Peraturan Menteri LHK No. 70 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Emisi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah/Limbah Termal (Insinerator),” *KLHK*, 2016.
- [16] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, “Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup,” *Pemerintah Republik Indonesia*, 2021.