

Filter Cerobong Asap Cyclone Dust Collector untuk Mengurangi Emisi Insinerator

Hurip Jayadi

Jurusan Kesehatan Lingkungan, Poltekkes Kemenkes Surabaya, Surabaya, Indonesia; huripdewi@gmail.com
(koresponden)

ABSTRACT

Improving air quality is a major challenge in air sanitation. Incinerator is a waste burning device that produces emissions such as particulates, sulfur dioxide gas (SO₂), nitrogen oxide (NO_x), carbon monoxide (CO) which have the potential to pollute the environment and endanger health. This study aimed to test the effectiveness of various variations in the depth of the cyclone dust collector chimney filter pipe to reduce incinerator emissions. This study used a simple experimental design, which was conducted at a public health center. The test was carried out by burning medical solid waste in an incinerator, with variations in the depth of the chimney filter pipe being 40 cm, 60 cm and 80 cm. The incinerator emissions measured were SO₂, NO_x and CO gases, which were taken using a midget impinger. Examination of particulates and gases was carried out using the gravimetric and spectrophotometer methods, respectively. Differences in emissions were analyzed descriptively. The results of the analysis showed that in 3 variations in pipe depth; the total particulates were 250, 180 and 125 (quality standard = 120); SO₂ is 343, 298 and 245 (standard = 210); NO_x is 522, 490 and 450 (standard = 470); CO is 753, 693 and 630 (standard = 625). It can be seen that in all variations of pipe depth, all emission indicators that were previously above the standard have decreased below the standard. The increasing depth of the pipe further reduces emissions. It is concluded that the cyclone dust collector is successful in reducing incinerator emissions, with the best results in the deepest pipe.

Keywords: chimney filter; cyclone dust collector; incinerator emissions

ABSTRAK

Peningkatan kualitas udara menjadi tantangan utama dalam penyehatan udara. Insinerator merupakan alat pembakar sampah menghasilkan emisi seperti partikulat, gas sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO) yang berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini untuk menguji efektivitas berbagai variasi kedalaman pipa filter cerobong asap *cyclone dust collector* untuk mengurangi emisi insinerator. Studi ini menggunakan rancangan eksperimen sederhana, yang dilakukan di pusat kesehatan masyarakat. Pengujian dilakukan dengan membakar limbah padat medis pada insinerator, dengan variasi kedalaman pipa filter cerobong asap adalah 40 cm, 60 cm dan 80 cm. Emisi insinerator yang diukur adalah gas SO₂, NO_x dan CO, yang diambil menggunakan *midget impinger*. Pemeriksaan partikulat dan gas masing-masing dilakukan dengan metode gravimetri dan spektrofotometer. Perbedaan emisi dianalisis secara deskriptif. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada 3 variasi kedalaman pipa; total partikulat adalah 250, 180 dan 125 (baku mutu = 120); SO₂ adalah 343, 298 dan 245 (baku mutu = 210); NO_x adalah 522, 490 dan 450 (baku mutu = 470); CO adalah 753, 693 dan 630 (baku mutu = 625). Terlihat bahwa pada semua variasi kedalaman pipa, semua indikator emisi yang sebelumnya di atas baku mutu telah menurun di bawah baku mutu. Bertambahkannya kedalaman pipa, semakin menurunkan emisi. Disimpulkan bahwa *cyclone dust collector* berhasil menurunkan emisi insinerator, dengan hasil terbaik pada pipa terdalam.

Kata kunci: filter cerobong asap; *cyclone dust collector*; emisi insinerator

PENDAHULUAN

Permasalahan emisi dari insinerator telah menjadi perhatian global karena dampaknya terhadap kualitas udara dan kesehatan manusia. Insinerator yang banyak digunakan untuk pembakaran limbah padat, menghasilkan berbagai polutan udara seperti partikulat, sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), dan karbon monoksida (CO).⁽¹⁾ Emisi dari insinerator yang menghasilkan polutan berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia mendorong perlunya penelitian lebih lanjut tentang efektivitas teknologi pengendalian polusi udara seperti *cyclone dust collector*. Polutan ini jika tidak diolah dengan baik, dapat menyebabkan kerusakan lingkungan dan risiko kesehatan yang serius, seperti gangguan pernapasan dan penyakit kardiovaskular.⁽²⁾ Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk mengurangi emisi ini adalah dengan menggunakan teknologi pengendalian polusi udara, salah satunya adalah *cyclone dust collector*. Namun, efektivitas teknologi ini dalam berbagai kondisi operasional perlu diteliti lebih lanjut, terutama terkait dengan variasi ukuran partikel yang diemisikan oleh insinerator.⁽³⁾

Peningkatan kapasitas insinerator untuk mengelola limbah padat di berbagai negara telah disertai dengan peningkatan emisi polutan udara.⁽⁴⁾ Insinerator merupakan salah satu sumber utama polutan udara di lingkungan perkotaan, yang berkontribusi terhadap peningkatan kadar NO_x dan CO di atmosfer.⁽⁵⁾ Meskipun demikian, teknologi yang ada saat ini belum sepenuhnya efektif dalam mengatasi berbagai jenis polutan yang dihasilkan.⁽⁶⁾ Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan emisi dari insinerator adalah kontrol terhadap partikulat yang dihasilkan. Partikulat yang dihasilkan oleh proses pembakaran limbah umumnya memiliki berbagai ukuran, mulai dari PM₁₀ hingga PM_{2.5}, yang dapat masuk ke dalam sistem pernapasan manusia dan menyebabkan gangguan kesehatan serius.⁽²⁾ Selain itu, emisi gas seperti SO₂ dan NO_x yang merupakan hasil pembakaran bahan organik yang mengandung sulfur dan nitrogen, juga menimbulkan ancaman besar terhadap lingkungan, seperti pembentukan hujan asam dan peningkatan efek rumah kaca.⁽⁷⁾

Cyclone dust collector telah lama digunakan sebagai salah satu solusi untuk mengurangi partikulat dalam gas buang insinerator, dengan prinsip kerja memisahkan partikel debu dari aliran gas menggunakan gaya sentrifugal.⁽⁸⁾ Namun, masih terdapat tantangan terkait efektivitas alat ini dalam menangani polutan dengan karakteristik yang berbeda, seperti ukuran partikel yang sangat kecil dan komponen gas beracun seperti SO₂ dan

NO_x.⁽⁹⁾ Penelitian yang lebih mendalam diperlukan untuk mengevaluasi performa teknologi ini dalam berbagai kondisi operasional, seperti variasi dalam kecepatan aliran gas dan perubahan beban pembakaran.⁽¹⁰⁾

Penggunaan *cyclone dust collector* telah banyak diadopsi dalam berbagai sektor industri, terutama dalam upaya pengendalian polusi udara.⁽¹¹⁾ Teknologi ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain efisiensi tinggi dalam mengurangi partikulat besar, biaya operasional yang relatif rendah, serta kemudahan dalam pemasangan dan perawatan.⁽³⁾ Namun, meski efektif dalam menangkap partikel berukuran besar, performa *cyclone dust collector* sering kali menurun ketika dihadapkan pada partikel halus seperti PM_{2.5} yang lebih berbahaya bagi kesehatan.⁽¹²⁾ Oleh karena itu, beberapa penelitian terbaru telah berfokus pada pengembangan desain *cyclone dust collector* untuk meningkatkan efektivitasnya dalam menangani partikel-partikel halus.⁽¹³⁾

Modifikasi pada desain pipa cerobong dan pengaturan kecepatan aliran gas dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi *cyclone dust collector*. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan pada geometri alat, seperti memperpanjang panjang pipa atau mengurangi diameter *inlet*, dapat meningkatkan gaya sentrifugal yang digunakan untuk memisahkan partikel, sehingga memperbaiki efisiensi pengumpulan partikulat halus.⁽¹⁴⁾ Selain itu, integrasi *cyclone dust collector* dengan teknologi pengendalian emisi lainnya, seperti *wet scrubber*, telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam menurunkan emisi gas berbahaya seperti SO₂ dan NO_x.⁽¹⁵⁾

Namun, terlepas dari berbagai perbaikan ini, penggunaan *cyclone dust collector* pada insinerator skala kecil dan menengah masih terbatas. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan teknologi dalam mengatasi variasi beban operasional dan fluktuasi komposisi limbah yang dibakar.⁽¹⁶⁾ Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja *cyclone dust collector* pada insinerator dengan berbagai jenis limbah, serta upaya integrasi dengan teknologi lain untuk meningkatkan efisiensi pengendalian emisi secara keseluruhan.⁽¹⁷⁾

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan terkait pengembangan teknologi *cyclone dust collector*, masih terdapat beberapa celah dalam literatur yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Pertama, sebagian besar penelitian lebih berfokus pada pengurangan partikulat besar, sementara efektivitas alat ini dalam mengurangi partikel halus (PM_{2.5} dan PM₁) belum diteliti secara komprehensif.⁽¹⁸⁾

Meskipun beberapa penelitian telah mengusulkan desain baru untuk meningkatkan performa *cyclone dust collector*, masih sedikit yang meneliti dampak dari variasi kecepatan aliran gas dan perubahan geometri pipa pada efisiensi pengumpulan partikulat dan gas beracun secara bersamaan.^(19,20) Penelitian sebelumnya pada umumnya berfokus pada satu jenis polutan saja, tanpa mempertimbangkan interaksi antara pengendalian partikulat dan emisi gas dalam satu sistem yang terintegrasi. Hal ini menciptakan kebutuhan untuk penelitian lebih lanjut yang tidak hanya berfokus pada pengendalian partikulat tetapi juga mempertimbangkan pengendalian emisi gas beracun.⁽²⁾

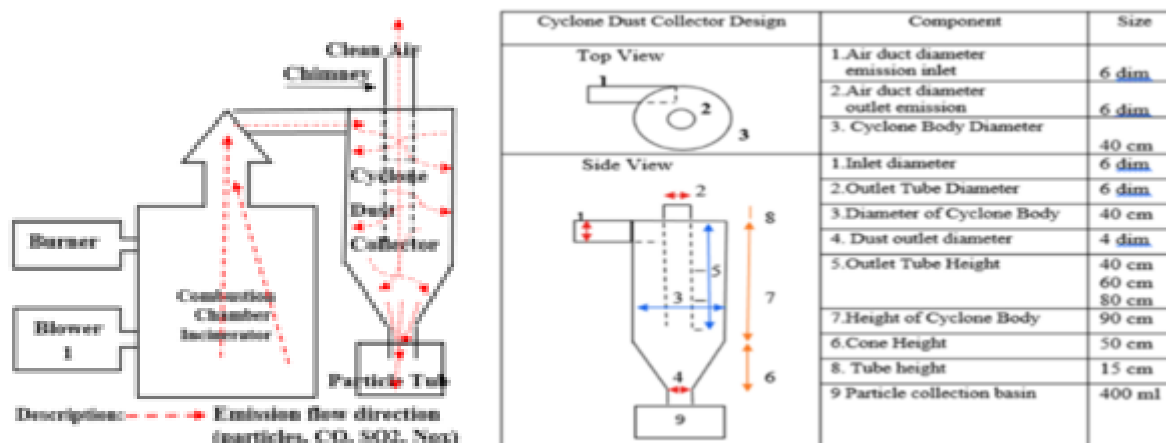
Berdasarkan latar belakang di atas maka perlu dilakukan evaluasi efektivitas *cyclone dust collector* dalam mengurangi emisi insinerator, baik dalam bentuk partikulat maupun gas berbahaya seperti SO₂, NO_x, dan CO.

METODE

Desain penelitian ini adalah eksperimen sederhana, yang dilakukan di Prodi Sanitasi Kampus Magetan, Poltekkes Kemenkes Surabaya pada bulan Mei sampai Juli 2024. Variabel bebas dalam penelitian ini variasi kedalaman pipa pada filter cerobong asap dengan tipe *cyclone dust collector*. Sementara itu, variabel terikat adalah emisi insinerator yang terdiri atas partikel, gas SO₂, NO_x dan CO.

Tahapan dalam penelitian ini meliputi:

- 1) Perencanaan eksperimen:
 - a. Pembuatan desain filter cerobong asap *cyclone dust collector* insinerator
 - b. Pembuatan *cyclone dust collector*
 - c. Perakitan komponen filter cerobong asap untuk membuat prototipe filter cerobong asap *cyclone dust collector* insinerator.



Gambar 1. Desain filter cerobong asap Gambar 2. Desain cyclone dust collector
cyclone dust collector insinerator

- d. Pengujian prototipe filter cerobong asap *cyclone dust collector* insinerator, Pengujian diawali dengan pembakaran sampah medis seberat 5 kg selama semua sampah habis terbakar. selama proses pembakaran berlangsung kondisi, kemampuan seluruh komponen filter cerobong asap *cyclone dust collector* insinerator dievaluasi. Bila kondisi operasional tidak optimal, dilakukan perbaikan, dan jika kemampuan filter kurang

efektif, dilakukan penyempurnaan. Proses ini terus berlanjut secara berulang hingga tercapai kondisi yang optimal dan efektivitas yang diharapkan.

2) Pengambilan sampel dan pemeriksaan sampel :

Pengambilan sampel emisi dilakukan setelah kondisi proses pembakaran mencapai kestabilan. Proses dimulai dengan memasukkan limbah medis seberat 5 kg ke insinerator dan dibakar selama 10 menit. Selanjutnya, sampah seberat 5 kg dimasukkan ke insinator setiap 10-15 menit untuk menjaga kestabilan pembakaran. Pembakaran limbah berlangsung secara terus-menerus selama proses pengambilan sampel.

Pengambilan sampel diulang 3 kali. Tempat pengambilan sampel emisi di insinerator, di *cyclone dust collector*. Total partikulat diambil dengan alat *high volume sampler*, parameter gas SO₂, NO_x dan CO diambil dengan *migget impinger*.

Sampel diperiksa di laboratorium fisika kimia Program Studi Sanitasi Magetan, Poltekkes Kemenkes Surabaya. Pemeriksaan partikulat dilakukan dengan metode gravimetri, dan pemeriksaan gas SO₂, NO_x dan CO menggunakan spektrofotometer.

Data hasil pengujian filter cerobong asap *cyclone dust collector* pada insinerator disajikan dalam tabel dan dianalisis secara deskriptif. Nilai rata-rata dari hasil pengujian dihitung, kemudian dibandingkan dengan baku mutu emisi yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor P.70/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 tentang Baku Mutu Emisi Untuk Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal.

HASIL

Berdasarkan Tabel 1, emisi insinerator menunjukkan bahwa konsentrasi total partikulat sebesar 330 mg/Nm³, jauh melampaui baku mutu yang ditetapkan sebesar 120 mg/Nm³, namun penurunan emisi mulai terlihat dengan peningkatan kedalaman pipa: pada kedalaman 40 cm, emisi berkurang menjadi 250 mg/Nm³, diikuti oleh pengurangan lebih lanjut menjadi 180 mg/Nm³ pada kedalaman 60 cm, meskipun keduanya masih melampaui ambang batas; akhirnya, pada kedalaman 80 cm, emisi berhasil ditekan hingga 125 mg/Nm³, yang mendekati standar tetapi tetap sedikit di atas baku mutu yang diizinkan.

Tabel 1. Hasil rata-rata pemeriksaan laboratorium udara emisi Insinerator dan baku mutu emisi

Parameter udara emisi	Emisi insinerator	Emisi <i>cyclone dust collector</i> pada kedalam pipa cerobong asap			Baku mutu (mg/Nm ³)
		40 cm	60 cm	80 cm	
Total partikulat	330	250	180	125	120
SO ₂	397	343	298	245	210
NO _x	586	522	490	450	470
CO	831	753	693	630	625

Emisi awal SO₂ dari insinerator tercatat sebesar 397 mg/Nm³, jauh melebihi baku mutu yang ditetapkan sebesar 210 mg/Nm³. Dengan penerapan kedalaman pipa sebesar 40 cm, emisi SO₂ berhasil diturunkan menjadi 343 mg/Nm³, kemudian berkurang lebih lanjut menjadi 298 mg/Nm³ pada kedalaman 60 cm. Pada kedalaman 80 cm, emisi SO₂ menurun signifikan hingga mencapai 245 mg/Nm³, namun nilai tersebut masih berada di atas ambang batas baku mutu yang berlaku.

Emisi NO_x dari insinerator awalnya tercatat sebesar 586 mg/Nm³, yang melebihi baku mutu sebesar 470 mg/Nm³, namun penyesuaian kedalaman pipa berhasil menurunkan emisi tersebut secara bertahap; pada kedalaman 40 cm emisi berkurang menjadi 522 mg/Nm³, dan pada kedalaman 60 cm menurun lebih lanjut menjadi 490 mg/Nm³ meskipun masih melampaui baku mutu. Akhirnya, pada kedalaman pipa 80 cm, emisi NO_x berhasil ditekan hingga 450 mg/Nm³, yang berarti telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan.

Emisi awal insinerator untuk CO tercatat sebesar 831 mg/Nm³, yang secara signifikan melebihi baku mutu yang ditetapkan sebesar 625 mg/Nm³. Pada kedalaman pipa 40 cm, emisi CO menurun menjadi 753 mg/Nm³, dan pada kedalaman 60 cm, angka ini kembali berkurang menjadi 693 mg/Nm³. Penurunan lebih lanjut terjadi pada kedalaman 80 cm, dengan emisi mencapai 630 mg/Nm³, meskipun masih sedikit melampaui batas baku mutu yang telah ditentukan.

PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, emisi total partikulat dari insinerator awalnya mencapai 330 mg/Nm³, yang jauh melebihi baku mutu sebesar 120 mg/Nm³. Penurunan emisi dengan menggunakan *cyclone dust collector* terlihat dengan penurunan emisi pada kedalaman 40 cm menjadi 250 mg/Nm³, pada 60 cm menjadi 180 mg/Nm³, dan pada 80 cm menjadi 125 mg/Nm³.⁽⁸⁾ Meskipun terjadi penurunan yang signifikan, emisi pada kedalaman pipa 80 cm masih sedikit di atas baku mutu yang ditetapkan.⁽²¹⁾ Penurunan emisi total partikulat ini sejalan dengan temuan penelitian lain yang menunjukkan bahwa *cyclone dust collector* mampu mengurangi emisi partikulat dengan efisiensi tinggi pada instalasi pengolahan gas buang.⁽²²⁾ Efisiensi penangkapan partikulat oleh *cyclone dust collector* dapat mencapai 90%, tergantung pada kecepatan aliran gas dan desain sistem filtrasi.⁽²³⁾ Namun, variasi pada kedalaman pipa cerobong asap dapat mempengaruhi efisiensi penurunan, sebagaimana diindikasikan oleh hasil penelitian ini.⁽²⁴⁾

Meskipun demikian, terdapat tantangan dalam memenuhi baku mutu yang sangat ketat untuk emisi partikulat, terutama dalam industri yang menghasilkan volume besar partikel debu halus.⁽²⁵⁾ Studi peneliti lain juga menunjukkan bahwa meskipun teknologi *cyclone* cukup efektif, penggabungan teknologi lain seperti *Wet Scrubber* sering diperlukan untuk mencapai standar emisi yang lebih rendah.⁽²⁶⁾

Emisi SO₂ dari insinerator dalam penelitian ini lebih tinggi dari baku mutu. Dengan penerapan *cyclone dust collector* emisi berkurang, baik pada kedalaman pipa 40 cm, pada 60 cm, pada kedalaman 80 cm. Namun, penurunan ini belum cukup untuk memenuhi baku mutu, karena emisi masih berada di atas ambang batas yang ditetapkan.⁽²⁷⁾ Penelitian lain menemukan bahwa *cyclone dust collector* kurang efektif dalam menurunkan emisi gas sulfur dibandingkan dengan teknologi lain seperti *dry scrubber* atau *flue gas desulfurization* (FGD).⁽²⁸⁾ *Flue gas desulfurization* (FGD), mampu menurunkan emisi SO₂ hingga 95%, jauh lebih efektif dibandingkan *cyclone dust collector* yang lebih cocok untuk menangkap partikulat padat.⁽²⁹⁾

Efektivitas teknologi penurunan SO₂ sangat tergantung pada karakteristik gas buang dan jenis bahan bakar yang digunakan.⁽³⁰⁾ Sebuah penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem hybrid antara *cyclone* dan FGD dapat meningkatkan efisiensi pengurangan SO₂, namun biaya implementasi menjadi kendala utama.⁽³¹⁾ Emisi oksida nitrogen (NO_x) dari insinerator sebelum menggunakan *cyclone dust collector* lebih tinggi dari baku mutu. Penggunaan *cyclone dust collector* berhasil menurunkan emisi baik pada kedalaman 40 cm, pada 60 cm, dan pada kedalaman 80 cm. Pada kedalaman 80 cm, emisi NO_x telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan.⁽³²⁾

Penurunan emisi NO_x dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penurunan emisi NO_x dapat penggunaan teknologi *cyclone* cukup terbatas.⁽³³⁾ Teknologi *cyclone* lebih efektif untuk menangkap partikel padat dan kurang optimal dalam menurunkan konsentrasi gas-gas berbahaya seperti NO_x.⁽³⁴⁾ Oleh karena itu, meskipun penurunan NO_x dalam penelitian ini signifikan, metode tambahan seperti *selective catalytic reduction* (SCR) sering kali diperlukan untuk mencapai penurunan yang lebih besar.⁽³³⁾ Beberapa penelitian lain, menunjukkan bahwa penggunaan sistem SCR bersama dengan *cyclone dust collector* dapat mengurangi emisi NO_x hingga 90%. Namun, integrasi teknologi ini sering kali memerlukan investasi tambahan dan perawatan yang lebih rumit.⁽⁸⁾

Emisi CO dari insinerator dalam penelitian ini awalnya sebesar jauh melebihi baku mutu. Setelah penerapan *cyclone dust collector*, emisi CO berkurang menjadi pada kedalaman 40 cm, pada 60 cm, pada kedalaman 80 cm.⁽³⁵⁾ Namun, emisi CO masih sedikit di atas baku mutu yang ditetapkan. Hasil ini konsisten dengan penelitian lain, yang menemukan bahwa *cyclone dust collector* memiliki keterbatasan dalam menangani emisi gas CO, karena mekanisme filtrasi lebih diarahkan pada partikel padat.⁽⁸⁾ Untuk menurunkan emisi CO, teknologi seperti *catalytic converter* atau *thermal oxidizer* sering kali lebih efektif.⁽⁸⁾ Peneliti lain juga menunjukkan bahwa emisi CO sering merupakan hasil dari pembakaran yang tidak sempurna, dan peningkatan efisiensi pembakaran dapat mengurangi emisi CO secara signifikan.⁽³⁶⁾ Oleh karena itu, meskipun penggunaan *cyclone dust collector* membantu menurunkan emisi, pengendalian CO yang optimal memerlukan pendekatan yang lebih spesifik.⁽¹⁵⁾

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun terjadi penurunan emisi dengan peningkatan kedalaman pipa, konsentrasi total partikulat, SO₂, dan CO tetap melebihi baku mutu yang ditetapkan, bahkan pada kedalaman 80 cm. Selain itu, meskipun emisi NO_x berhasil ditekan hingga memenuhi ambang batas pada kedalaman 80 cm, proses ini membutuhkan pengoptimalan lebih lanjut untuk konsistensi dalam kondisi operasional yang bervariasi. Secara keseluruhan, teknologi yang digunakan masih memiliki kelemahan dalam memastikan seluruh jenis polutan berada di bawah baku mutu secara seragam.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian disimpulkan bahwa penggunaan *cyclone dust collector* pada berbagai kedalaman pipa cerobong asap memberikan dampak signifikan dalam menurunkan emisi partikulat, SO₂, NO_x, dan CO dari insinerator, dengan hasil terbaik pada pipa terdalam.

DAFTAR PUSTAKA

1. Shetty SS, Deepthi D, Harshitha S, Sonkusare S, Naik PB, Madhyastha H. Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon*. 2023;9(9).
2. Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution. *a Rev*. 8:14.
3. Stoumpos AI, Kitsios F, Talias MA. Digital transformation in healthcare: technology acceptance and its applications. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(4):3407.
4. Siddiqua A, Hahladakis JN, Al-Attiya WAKA. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environ Sci Pollut Res*. 2022;29(39):58514–36.
5. Jonidi Jafari A, Charkhloo E, Pasalari H. Urban air pollution control policies and strategies: a systematic review. *J Environ Heal Sci Eng*. 2021;19:1911–40.
6. Mumtaz H, Riaz MH, Wajid H, Saqib M, Zeeshan MH, Khan SE, et al. Current challenges and potential solutions to the use of digital health technologies in evidence generation: a narrative review. *Front Digit Heal*. 2023;5:1203945.
7. Asif Z, Chen Z, Wang H, Zhu Y. Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. *Clean Technol Environ policy*. 2022;24(8):2329–47.
8. Ciobanu C, Istrate IA, Tudor P, Voicu G. Dust emission monitoring in cement plant mills: a case study in Romania. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(17):9096.
9. Ryan N, Vieira D, Gyamfi J, Ojo T, Shelley D, Ogedegbe O, et al. Development of the ASSESS tool: a comprehensive tool to Support rEporting and critical appraiSal of qualitative, quantitative, and mixed methods implementation reSearch outcomes. *Implement Sci Commun*. 2022;3(1):34.
10. Bhati D, Deogade MS, Kanyal D. Improving patient outcomes through effective hospital administration: a comprehensive review. *Cureus*. 2023;15(10).
11. Anlimah F, Gopaldasani V, MacPhail C, Davies B. A systematic review of the effectiveness of dust control

- measures adopted to reduce workplace exposure. *Environ Sci Pollut Res.* 2023;30(19):54407–28.
12. Thangavel P, Park D, Lee YC. Recent insights into particulate matter (PM_{2.5})-mediated toxicity in humans: an overview. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(12):7511.
 13. Tran V Van, Park D, Lee YC. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(8):2927.
 14. Bellicha A, van Baak MA, Battista F, Beaulieu K, Blundell JE, Busetto L, et al. Effect of exercise training on weight loss, body composition changes, and weight maintenance in adults with overweight or obesity: An overview of 12 systematic reviews and 149 studies. *Obes Rev.* 2021;22:e13256.
 15. Ramaswamy K, Jule LT, N N, Subramanian K, Seenivasan V. Reduction of environmental chemicals, toxicity and particulate matter in wet scrubber device to achieve zero emissions. *Sci Rep.* 2022;12(1):9170.
 16. Gutberlet J, Uddin SMN. Household waste and health risks affecting waste pickers and the environment in low-and middle-income countries. *Int J Occup Environ Health.* 2017;23(4):299–310.
 17. Willmington C, Belardi P, Murante AM, Vainieri M. The contribution of benchmarking to quality improvement in healthcare. A systematic literature review. *BMC Health Serv Res.* 2022;22(1):139.
 18. Yan B, Zhang X. What research has been conducted on procrastination? Evidence from a systematical bibliometric analysis. *Front Psychol.* 2022; 13: 809044. 2022.
 19. Zhenjing G, Chupradit S, Ku KY, Nassani AA, Haffar M. Impact of employees' workplace environment on employees' performance: a multi-mediation model. *Front public Heal.* 2022;10:890400.
 20. Smith JD, Hasan M. Quantitative approaches for the evaluation of implementation research studies. *Psychiatry Res.* 2020;283:112521.
 21. Erickson LE. Reducing greenhouse gas emissions and improving air quality: Two global challenges. *Environ Prog Sustain Energy.* 2017;36(4):982–8.
 22. Fussell JC, Franklin M, Green DC, Gustafsson M, Harrison RM, Hicks W, et al. A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures. *Environ Sci Technol.* 2022;56(11):6813–35.
 23. Dziubak T, Dziubak SD. experimental study of filtration materials used in the car air intake. *Materials.* 2020; 13 (16): 3498.
 24. Bordoni P, Ody P, Kotus J, Kostek B. Sounding mechanism of a flue organ pipe—A multi-sensor measurement approach. *Sensors.* 2024;24(6):1962.
 25. Nazarenko Y, Pal D, Ariya PA. Air quality standards for the concentration of particulate matter 2.5, global descriptive analysis. *Bull World Health Organ.* 2021;99(2):125.
 26. Lau YY, Yip TL, Dulebenets MA, Tang YM, Kawasaki T. A review of historical changes of tropical and extra-tropical cyclones: a comparative analysis of the United States, Europe, and Asia. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(8):4499.
 27. Xi Z, Tong D, Honggang C, Jinjin L. Homogeneous oxidation of SO₂ in the tail gas incinerator of sulfur recovery unit. *BMC Chem.* 2023;17(1):178.
 28. Massar M, Reza I, Rahman SM, Abdullah SMH, Jamal A, Al-Ismail FS. Impacts of autonomous vehicles on greenhouse gas emissions—positive or negative? *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(11):5567.
 29. Ding X, Li Q, Wu D, Liang Y, Xu X, Xie G, et al. Unexpectedly increased particle emissions from the steel industry determined by wet/semidry/dry flue gas desulfurization technologies. *Environ Sci Technol.* 2019;53(17):10361–70.
 30. Patel AB, Shaikh S, Jain KR, Desai C, Madamwar D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches. *Front Microbiol.* 2020;11:562813.
 31. Landes SJ, McBain SA, Curran GM. Reprint of: an introduction to effectiveness-implementation hybrid designs. *Psychiatry Res.* 2020;283:112630.
 32. McNevin TF. Recent increases in nitrogen oxide (NO_x) emissions from coal-fired electric generating units equipped with selective catalytic reduction. *J Air Waste Manage Assoc.* 2016;66(1):66–75.
 33. Ali M, Hussain I, Mehmud I, Umair M, Hu S, Sharif HMA. Recent breakthroughs and advancements in NO_x and SO_x reduction using nanomaterials-based technologies: A state-of-the-art review. *Nanomaterials.* 2021;11(12):3301.
 34. Ergashev Y, Egamberdiev E, Mirkhodjaeva D, Akmalova G, Umarova M, Kholdarov R. Obtaining a filter material used in gas and air purification. In: *E3S Web of Conferences.* EDP Sciences; 2023. p. 1012.
 35. Vural A, Dolanbay T. Early and late adverse clinical outcomes of severe carbon monoxide intoxication: A cross-sectional retrospective study. *PLoS One.* 2024;19(8):e0301399.
 36. Perera F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15(1):16.