

EVALUASI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH NOZZLE PADA WET SCRUBBER TERHADAP PENURUNAN KONSENTRASI CO₂ DALAM GAS BUANG INSINERATOR SAMPAH

EXPERIMENTAL EVALUATION OF NOZZLE NUMBER IN A WET SCRUBBER FOR REDUCING CO₂ CONCENTRATION IN WASTE INCINERATOR FLUE GAS

Fisal Yuliansyah¹⁾, I Wayan Wawan Mariki¹⁾, Imam Riduan Tanaka¹⁾ Muhammad Hariz Dedy Sayogi¹⁾

¹Politeknik Batulicin, Kalimantan Selatan, Indonesia

email: fisalyulians17@gmail.com*, wayan@politeknikbatulicin.ac.id, Imam@politeknikbatulicin.ac.id, Muhammadharizdedysayogi@gmail.com

Abstract

Received:
21 Juli 2026

Accepted:
13 Oktober
2026

Published:
13 Oktober
2026

his study experimentally evaluated the effects of 2-, 3-, and 4-nozzle wet-scrubber configurations on CO₂ concentration and downstream temperature profiles in a laboratory-scale waste incinerator. Experiments were conducted for 90 min with four independent replicates for each configuration. CO₂ concentration was measured at 10-min intervals, while temperatures were monitored in the combustion chamber, purification chamber, and outlet. Relative to the baseline condition, average measured CO₂ concentrations decreased by 17.29%, 25.54%, and 44.41% for the 2-, 3-, and 4-nozzle configurations, respectively. The four-nozzle configuration also produced the lowest average purification-chamber and outlet temperatures. These results demonstrate that increasing spray coverage can reduce the measured CO₂ concentration and thermal load downstream of the incinerator under the investigated conditions.

Keywords: Waste Incinerator, Wet Scrubber, Carbon Dioxide (CO₂), Flue Gas Emissions, Emission Control

Abstrak

Penelitian ini secara eksperimental mengevaluasi pengaruh konfigurasi *wet scrubber* dengan 2, 3, dan 4 nozzle terhadap konsentrasi CO₂ serta profil temperatur pada bagian hilir insinerator sampah skala laboratorium. Pengujian dilakukan selama 90 menit dengan empat kali pengulangan independen untuk setiap konfigurasi. Konsentrasi CO₂ diukur pada interval 10 menit, sedangkan temperatur dipantau pada ruang bakar, tabung purifikasi, dan *outlet*. Dibandingkan dengan kondisi baseline, rata-rata konsentrasi CO₂ terukur mengalami penurunan masing-masing sebesar 17,29%, 25,54%, dan 44,41% pada konfigurasi 2, 3, dan 4 nozzle. Konfigurasi empat nozzle juga menghasilkan temperatur rata-rata terendah pada tabung purifikasi dan *outlet*. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan cakupan penyemprotan (*spray coverage*) dapat menurunkan konsentrasi CO₂ terukur serta beban termal pada bagian hilir insinerator dalam kondisi pengujian yang dilakukan.

Kata Kunci: Insinerator, *Wet Scrubber*, Karbon Dioksida (CO₂), Emisi Gas Buang, Pengendalian Emisi

DOI: 10.20527/jtam_rotary.v7i1

How to cite: Yuliansyah, F., Mariki, I. W. W., Tanaka, I. R., & Sayogi, M. H. D., "Evaluasi Eksperimental Pengaruh Jumlah Nozzle Pada Wet Scrubber Terhadap Penurunan Konsentrasi CO₂ Dalam Gas Buang Insinerator Sampah". *JTAM ROTARY*, 8(2), 124-133, 2026.

PENDAHULUAN

Permasalahan sampah merupakan salah satu isu lingkungan paling mendesak yang dihadapi hampir seluruh negara, baik negara maju maupun berkembang. Peningkatan jumlah penduduk yang terus berlangsung, diiringi dengan perubahan pola konsumsi masyarakat modern, menyebabkan volume timbunan sampah meningkat secara signifikan dari tahun ke tahun. Kondisi ini menuntut adanya sistem pengelolaan sampah yang tidak hanya mampu menangani volume yang besar, tetapi juga dilakukan secara efisien dan berkelanjutan agar tidak menimbulkan dampak negatif baru terhadap lingkungan.

Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas konsumsi masyarakat berdampak langsung pada peningkatan volume sampah, baik sampah domestik maupun industri. Pertumbuhan ini tidak hanya terjadi pada aspek kuantitas, tetapi juga pada kompleksitas komposisi sampah yang dihasilkan, mulai dari sampah organik, anorganik, hingga limbah yang sulit terurai secara alami. Kondisi tersebut menuntut penerapan metode pengelolaan sampah yang mampu mereduksi volume secara cepat dan signifikan, mengingat keterbatasan lahan untuk tempat pembuangan akhir (TPA) menjadi kendala yang semakin nyata di berbagai wilayah perkotaan.

Salah satu metode pengelolaan sampah yang umum digunakan untuk mengurangi volume sampah secara signifikan adalah insinerasi, yaitu proses pembakaran sampah pada suhu tinggi. Metode ini dipilih karena mampu mereduksi volume sampah hingga 85%, sekaligus menghasilkan residu berupa abu yang jauh lebih mudah dikelola dibandingkan sampah dalam bentuk aslinya (Mahir & Manyele, 2023). Selain aspek reduksi volume, insinerasi juga menawarkan potensi pemanfaatan energi panas hasil pembakaran, sehingga teknologi ini banyak diadopsi sebagai bagian dari sistem pengelolaan sampah terpadu di berbagai kota besar (Mahir & Manyele, 2023; Maphuhla & Oyedeji, 2025).

Meskipun efektif dalam mereduksi volume sampah, proses pembakaran pada insinerator menghasilkan emisi gas buang seperti karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO_2), serta partikulat yang berpotensi mencemari kualitas udara dan membahayakan kesehatan masyarakat di sekitar lokasi pembakaran (Maphuhla & Oyedeji, 2025). Gas-gas tersebut dihasilkan dari proses oksidasi bahan organik dan anorganik dalam sampah yang tidak selalu berlangsung sempurna, terutama apabila temperatur pembakaran dan waktu tinggal gas di ruang bakar tidak dikendalikan dengan baik (Salomone et al., 2023; Zhai et al., 2023). Dengan demikian, insinerasi tanpa sistem pengendalian emisi yang memadai justru berpotensi memindahkan permasalahan pencemaran dari fase padat (sampah) menjadi fase gas (polutan udara) (Hu et al., 2021).

Tingginya kadar CO_2 dan gas polutan lain dari hasil pembakaran sampah menjadi salah satu kontributor terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca serta penurunan kualitas udara ambien (Kim et al., 2025). Hal ini sejalan dengan berbagai kajian yang menunjukkan bahwa proses insinerasi tanpa sistem pengendalian emisi yang memadai dapat meningkatkan risiko gangguan pernapasan dan pencemaran lingkungan jangka panjang (Domingo, 2026). Paparan berkelanjutan terhadap gas-gas seperti CO, NO_x , dan SO_2 juga diketahui berkaitan dengan berbagai gangguan kesehatan, mulai dari iritasi saluran pernapasan hingga penyakit kardiovaskular pada populasi yang tinggal di sekitar fasilitas pembakaran sampah.

Mengingat dampak yang ditimbulkan bersifat jangka panjang dan berpotensi meluas ke wilayah pemukiman di sekitar lokasi insinerator, pengendalian emisi gas buang bukan lagi menjadi aspek tambahan, melainkan komponen wajib dalam desain sistem insinerasi modern. Berbagai negara telah menetapkan baku mutu emisi gas buang yang ketat bagi fasilitas insinerasi, sehingga operator insinerator dituntut untuk melengkapi unit

pembakaran dengan sistem pengendalian polusi udara yang efektif dan andal, tanpa mengorbankan efisiensi proses pembakaran itu sendiri (Fellner *et al.*, 2026).

Oleh karena itu, diperlukan inovasi teknologi tambahan yang dapat mengontrol dan menurunkan kadar emisi gas tersebut sebelum dilepaskan ke atmosfer. Inovasi ini idealnya bersifat aplikatif, relatif mudah diintegrasikan dengan unit insinerator yang sudah ada (Anders *et al.*, 2025). Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah purifier dengan metode penambahan sistem wet scrubber pada unit insinerator. *Wet scrubber* berfungsi untuk menyaring dan menetralisasi gas hasil pembakaran melalui mekanisme filtrasi, absorpsi, maupun reaksi kimia tertentu, sehingga dapat menurunkan konsentrasi gas berbahaya sebelum dibuang ke udara bebas (Maryudi *et al.*, 2022). Prinsip kerja utama *wet scrubber* adalah mengontakkan gas buang dengan droplet cairan penyerap yang disemprotkan melalui *nozzle*, sehingga molekul-molekul polutan dapat terlarut atau bereaksi secara kimiawi di dalam fase cair sebelum gas sisa dilepaskan ke atmosfer (Balas *et al.*, n.d.; M. Zhao *et al.*, 2021).

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa penerapan sistem purifikasi gas pada proses pembakaran dapat menurunkan kadar polutan secara signifikan, meskipun efektivitasnya bergantung pada desain dan jenis media wet scrubber yang digunakan (Chen *et al.*, 2024; M. Zhao *et al.*, 2021). Faktor-faktor seperti jenis larutan penyerap, konfigurasi *nozzle*, laju alir gas, serta waktu kontak antara gas dan cairan penyerap terbukti memengaruhi kinerja *wet scrubber* secara keseluruhan, sehingga optimalisasi parameter-parameter tersebut menjadi kunci untuk memaksimalkan efisiensi penurunan polutan.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan efektivitas wet scrubber dalam mengurangi partikulat dan gas asam. Namun, informasi mengenai pengaruh jumlah *nozzle* terhadap konsentrasi CO₂ sekaligus profil termal pada bagian hilir insinerator sampah skala kecil masih terbatas. Secara khusus, kajian yang mengevaluasi secara simultan konsentrasi CO₂, temperatur pada tabung purifikasi, dan temperatur outlet pada berbagai konfigurasi penyemprotan masih relatif sedikit. Oleh karena itu, penelitian ini secara eksperimental mengevaluasi konfigurasi 2, 3, dan 4 *nozzle* pada kondisi pembakaran yang dikendalikan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah *nozzle* terhadap konsentrasi CO₂ dan profil temperatur gas buang. Secara lebih spesifik, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi jumlah *nozzle* (2, 3, dan 4 *nozzle*) terhadap efektivitas penurunan kadar CO₂ serta profil temperatur pada ruang bakar, tabung purifikasi, dan pipa outlet insinerator.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa alternatif teknologi pengelolaan sampah yang lebih ramah lingkungan, serta menjadi rujukan dalam pengembangan sistem insinerator yang lebih efisien dan rendah emisi. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi operator fasilitas pengelolaan sampah dalam menentukan konfigurasi *nozzle wet scrubber* yang optimal, sehingga investasi pada teknologi purifikasi gas dapat memberikan hasil yang maksimal dengan biaya yang efisien (M. Zhao *et al.*, 2021).

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan melalui pendekatan eksperimental dengan membandingkan kondisi insinerator tanpa wet scrubber (*baseline/pre-scrubbing*) dan dengan penambahan wet scrubber pada tiga variasi konfigurasi, yaitu 2, 3, dan 4 *nozzle*. Pengukuran dilakukan pada unit insinerator sampah dengan interval waktu 10 menit selama total durasi operasi 90 menit, mencakup fase awal pembakaran, fase puncak, hingga fase burn-out.

Parameter yang diukur dalam penelitian ini meliputi kadar CO₂ pada gas buang serta profil temperatur pada tiga titik, yaitu ruang bakar (T1), tabung purifikasi (T2), dan pipa outlet (T3). Data kadar CO₂ dan temperatur yang diperoleh pada setiap variasi kemudian

dibandingkan dengan kondisi baseline untuk menghitung efisiensi penurunan menggunakan persamaan efisiensi standar, serta dianalisis secara statistik menggunakan uji [*paired t-test*] untuk menentukan signifikansi perbedaan antara kondisi sebelum dan setelah penambahan *wet scrubber*.

Berdasarkan uraian latar belakang permasalahan serta tinjauan pustaka yang telah dipaparkan, penambahan sistem *wet scrubber* pada insinerator sampah diproyeksikan mampu menjadi solusi teknis yang efektif dalam menekan emisi gas polutan hasil pembakaran. Prinsip kerja *wet scrubber*, yang mengontakkan gas buang dengan larutan penyerap melalui *nozzle*, memberikan landasan teoretis bahwa peningkatan jumlah titik semprot akan memperluas bidang kontak antara fase gas dan fase cair, sehingga proses absorpsi CO₂ serta gas polutan lainnya dapat berlangsung secara lebih optimal tanpa mereduksi efisiensi pembakaran pada ruang bakar. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa penambahan sistem *wet scrubber* pada insinerator sampah dapat menurunkan kadar CO₂ hasil pembakaran sampah secara signifikan dibandingkan dengan insinerator tanpa *wet scrubber*, dengan efektivitas penurunan yang diperkirakan meningkat seiring bertambahnya jumlah *nozzle* yang digunakan. Apabila hipotesis ini terbukti, temuan tersebut akan memperkuat landasan ilmiah bagi pengembangan sistem insinerator berbasis *wet scrubber* yang lebih optimal dan aplikatif, sekaligus berkontribusi terhadap upaya mitigasi pencemaran udara dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan desain *pre-test* and *post-test* untuk membandingkan kadar emisi gas hasil pembakaran sampah sebelum dan setelah penambahan sistem *wet scrubber* pada insinerator. Rancangan ini bertujuan untuk mengukur secara objektif efektivitas *wet scrubber* dalam menurunkan kadar CO₂.

Ruang Lingkup dan Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah unit insinerator sampah berskala laboratorium yang dimodifikasi dengan penambahan sistem *wet scrubber* gas buang. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada pengukuran Temperatur dan kadar CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran sampah jenis campuran biomassa, tanpa membahas aspek efisiensi pembakaran secara menyeluruh maupun dampak jangka panjang terhadap lingkungan.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Batulicin, pada bulan April hingga Mei tahun 2026.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi sampah dan biomassa kayu karet sebagai bahan baku pembakaran serta media *wet scrubber* berupa air. Alat utama yang digunakan terdiri dari 1 Unit insinerator sampah, Sistem *wet scrubber* (*water scrubber*) yang terintegrasi pada saluran gas buang Gas analyzer untuk mengukur kadar CO₂ dan temperatur (*termocouple*)

Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengukuran langsung kadar gas buang pada cerobong insinerator menggunakan *gas analyzer*, dilakukan dalam dua kondisi, yaitu sebelum (tanpa *wet scrubber*) dan setelah (dengan *wet scrubber*) pada parameter pembakaran yang sama. Pengukuran dilakukan sebanyak 4 kali penulangan pada setiap kondisi untuk memastikan validitas data.

Teknik Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan kadar gas sebelum dan setelah penambahan *wet scrubber*. Persentase penurunan kadar gas dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\eta = ((C_0 - C_1) / C_0) \times 100\%$$

dengan:

η = efisiensi penurunan kadar gas (%)

C_0 = konsentrasi gas sebelum melewati *wet scrubber* (ppm)

C_1 = konsentrasi gas setelah melewati *wet scrubber* (ppm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur Reaktor, Tabung Purifikasi, dan Outlet

Pengambilan data temperatur pada reaktor (ruang bakar), tabung purifikasi, dan pipa outlet dilakukan dengan interval waktu setiap 10 menit, dimulai sejak awal penyalaan api dalam reaktor. Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan alat *thermocouple* pada tiga titik, yaitu T1 (ruang bakar), T2 (tabung purifikasi), dan T3 (pipa outlet). Pengujian dilakukan pada tiga variasi jumlah nozzle pada tabung purifikasi, yaitu 2, 3, dan 4 *nozzle*.

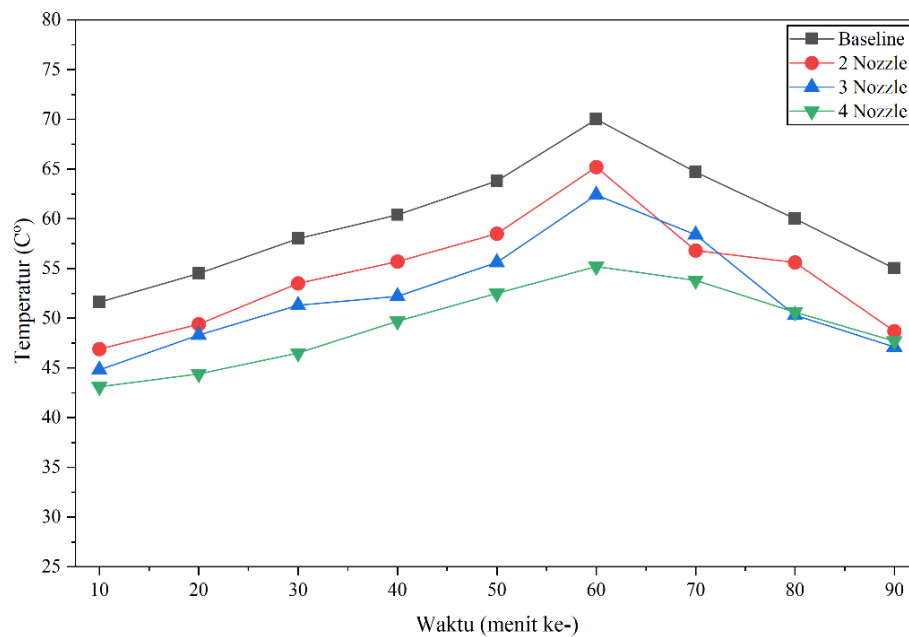
Tabel 1. Temperatur Pembakaran dengan 2, 3 dan 4 Nozzle pada Tabung Purifikasi

No.	Waktu (Menit ke-)	T1 Ruang Bakar (°C)	T2 Tabung Purifikasi (°C)				T3 Pipa Outlet (°C)			
			Baseline	2 Nozzle	3 Nozzle	4 Nozzle	Baseline	2 Nozzle	3 Nozzle	4 Nozzle
1	10	106,8	51.6	46.9	44.8	43.1	44.8	41.7	40.2	40.3
2	20	277,2	54.5	49.4	48.3	44.4	44.3	45.3	44.1	42.3
3	30	369,3	58	53.5	51.3	46.5	51.6	49.7	48.5	42.5
4	40	471,8	60.4	55.7	52.2	49.7	52.6	50.1	48.9	44.4
5	50	583,4	63.8	58.5	55.6	52.5	55	52.7	50.6	46.6
6	60	697,6	70	65.2	62.4	55.2	61.3	59.8	55.6	51.3
7	70	556,1	64.7	56.8	58.4	53.8	55.3	50.3	53.3	47.2
8	80	403,3	60	55.6	50.3	50.6	53.2	51.3	47.5	46.5
9	90	365,8	55	48.7	47.1	47.7	48.6	45.4	43.9	43.2

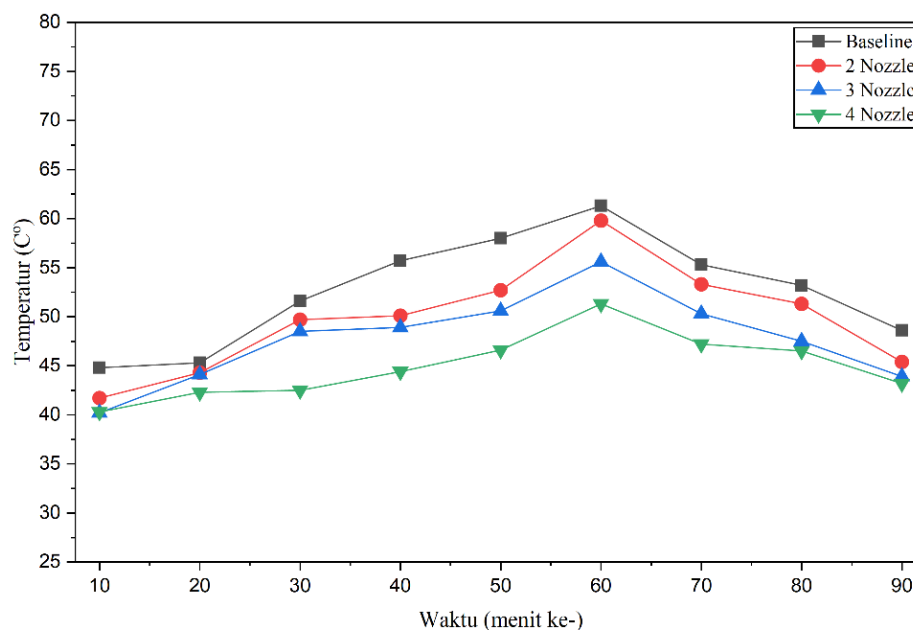
Berdasarkan hasil pengukuran selama 90 menit, temperatur ruang bakar (T1) menunjukkan pola peningkatan yang konsisten sejak awal proses pembakaran, yaitu dari 106,8°C pada menit ke-10 hingga mencapai titik puncak sebesar 697,6°C pada menit ke-60. Setelah mencapai puncak tersebut, temperatur mengalami penurunan bertahap menjadi 556,1°C pada menit ke-70, 403,3°C pada menit ke-80, dan 365,8°C pada menit ke-90, yang mengindikasikan bahwa fase pembakaran aktif (kondisi puncak pirolisis/pembakaran sampah) terjadi pada rentang menit ke-50 hingga ke-60, sebelum memasuki fase burn-out. Pola temperatur ruang bakar ini menjadi acuan penting untuk menganalisis bagaimana panas tersebut ditransfer dan terdisipasi menuju tabung purifikasi (T2) dan pipa outlet (T3) pada masing-masing variasi jumlah nozzle *wet scrubber*.

Pada saat T1 mencapai puncaknya di menit ke-60, temperatur tabung purifikasi (T2) menunjukkan perbedaan yang jelas antarvariasi. Pada kondisi tanpa *wet scrubber* (baseline), T2 tercatat paling tinggi yaitu 70°C, kemudian menurun menjadi 65,2°C pada

variasi 2 nozzle, 62,4°C pada variasi 3 nozzle, dan terendah pada variasi 4 nozzle sebesar 55,2°C. Pola penurunan yang sama juga konsisten terlihat apabila ditinjau dari rata-rata T2 selama keseluruhan waktu pengukuran (menit ke-10 hingga ke-90), yaitu 59,78°C pada baseline, 54,48°C pada 2 nozzle, 52,27°C pada 3 nozzle, dan 49,28°C pada 4 nozzle. Konsistensi antara nilai puncak dan nilai rata-rata ini memperkuat indikasi bahwa penambahan jumlah nozzle wet scrubber secara efektif menurunkan panas yang terbawa (heat carry-over) dari ruang bakar menuju tabung purifikasi, kemungkinan besar melalui mekanisme pendinginan evaporatif dan kontak gas panas dengan butiran air yang disemprotkan.



Gambar 1. Grafik Hubungan Antara Temperatur Dan Waktu Pada Tabung Purifikasi



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Temperatur Dan Waktu Pada Pipa Outlet

Kecenderungan serupa juga teramati pada pipa outlet (T3). Pada menit ke-60, T3 tercatat sebesar 61,3°C pada kondisi baseline, kemudian menurun menjadi 59,8°C pada variasi 2 nozzle, 55,6°C pada variasi 3 nozzle, dan mencapai titik terendah sebesar 51,3°C pada variasi 4 nozzle. Sebagaimana pada T2, pola ini juga konsisten pada rata-rata T3 sepanjang durasi pengujian, yaitu 51,86°C (baseline), 49,59°C (2 nozzle), 48,07°C (3 nozzle), dan 44,92°C (4 nozzle). Penurunan progresif pada T2 maupun T3 seiring bertambahnya jumlah nozzle menunjukkan bahwa sistem wet scrubber dengan konfigurasi 4 nozzle memberikan efek pendinginan gas buang yang paling signifikan sebelum gas tersebut mencapai tabung purifikasi dan keluar melalui pipa outlet, tanpa mengubah pola termal ruang bakar itu sendiri yang tetap mencapai puncak 697,6°C pada menit yang sama.

Kondisi termal yang lebih terkendali pada tabung purifikasi memberikan implikasi positif terhadap efektivitas proses purifikasi gas. Sebagian besar media purifikasi, baik karbon aktif maupun larutan penyerap, memiliki rentang temperatur kerja optimal; apabila temperatur terlalu tinggi, kemampuan adsorpsi atau reaksi penetralan gas polutan justru dapat menurun (Mahir & Manyele, 2023). Dengan T2 puncak yang berhasil ditekan dari 70°C (baseline) menjadi 55,2°C pada variasi 4 nozzle—setara dengan penurunan sebesar 14,8°C atau sekitar 21,1%—serta penurunan rata-rata T2 sebesar 10,5°C (dari 59,78°C menjadi 49,28°C), variasi 4 nozzle dapat dikatakan menghasilkan lingkungan kerja tabung purifikasi yang paling mendukung kinerja media adsorpsi maupun larutan penyerap secara optimal, tanpa mengorbankan efisiensi pembakaran di ruang bakar yang tetap mencapai suhu tinggi hingga 697,6°C.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran temperatur pada T1, T2, dan T3 ini memperkuat temuan pada bagian sebelumnya terkait penurunan kadar gas polutan. Kondisi termal yang lebih terkendali pada tabung purifikasi dan pipa outlet—khususnya pada variasi 4 nozzle yang secara konsisten mencatatkan temperatur terendah baik pada titik puncak maupun rata-rata keseluruhan waktu pengujian—berkontribusi terhadap efektivitas proses filtrasi dan netralisasi gas hasil pembakaran sampah. Selain manfaat terhadap efisiensi purifikasi, temperatur operasional yang lebih rendah dan stabil pada T2 dan T3 juga berpotensi mengurangi tekanan termal (thermal stress) pada material tabung purifikasi dan pipa burner, sehingga dapat memperpanjang umur pakai komponen tersebut dalam jangka panjang.

Kadar CO₂

Pengukuran kadar gas buang dilakukan pada dua kondisi, yaitu sebelum (*pre-scrubbing*) dan setelah (*post-scrubbing*) penambahan wet scrubber pada insinerator sampah, dengan interval pengambilan data setiap 10 menit selama 90 menit operasi. Pengukuran *post-scrubbing* dilakukan pada tiga variasi jumlah nozzle, yaitu 2, 3, dan 4 nozzle, untuk melihat pengaruh jumlah titik semprot terhadap efektivitas penyerapan CO₂. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 2. Perbandingan Kadar Gas Buang Sebelum dan Setelah Penambahan *Wet Scrubber*

Waktu (Menit ke-)	Pre-Scrubbing	Post-Scrubbing 2 Nozzle	Post-Scrubbing 3 Nozzle	Post-Scrubbing 4 Nozzle
10	6752	5398	4387	3039
20	8786	6712	6287	4573
30	11373	10734	9427	7536
40	12906	11748	10656	8902
50	12107	11023	10020	7756
60	9187	7489	7013	5217
70	8059	6123	5721	4276
80	7758	5409	4958	3122

90

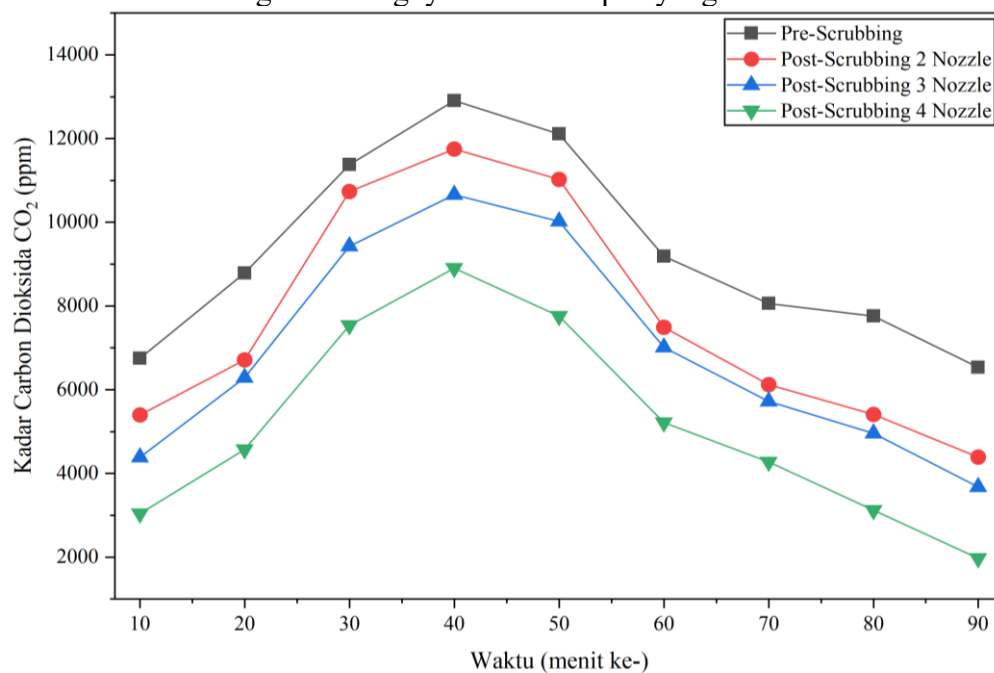
6534

4392

3678

1973

Berdasarkan Tabel 1, seluruh kondisi menunjukkan pola yang serupa, yaitu kadar CO₂ meningkat pada fase awal pembakaran, mencapai puncak pada menit ke-40, kemudian menurun secara bertahap hingga menit ke-90. Pada kondisi *pre-scrubbing*, kadar CO₂ meningkat dari 6.752 ppm (menit ke-10) menjadi puncaknya sebesar 12.906 ppm (menit ke-40), sebelum akhirnya turun menjadi 6.534 ppm pada menit ke-90. Pola kenaikan-puncak-penurunan yang sama juga konsisten terjadi pada seluruh variasi *post-scrubbing*, yang mengindikasikan bahwa menit ke-40 merepresentasikan fase pembakaran paling intensif, sedangkan menit-menit setelahnya merupakan fase *burn-out* di mana produksi gas CO₂ mulai menurun seiring berkurangnya massa sampah yang terbakar.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Kadar Gas Buang Sebelum dan Setelah Penambahan *Wet Scrubber*

Pada titik puncak (menit ke-40), efektivitas penurunan kadar CO₂ oleh *wet scrubber* sudah mulai terlihat, meskipun belum maksimal. Dibandingkan kondisi *pre-scrubbing* sebesar 12.906 ppm, variasi 2 *nozzle* mampu menurunkan kadar CO₂ menjadi 11.748 ppm (efisiensi 8,98%), variasi 3 *nozzle* menjadi 10.656 ppm (efisiensi 17,43%), dan variasi 4 *nozzle* menjadi 8.902 ppm (efisiensi 31,03%). Menariknya, efisiensi penurunan justru meningkat signifikan pada fase *burn-out* di menit ke-90, di mana variasi 2 *nozzle* mencapai efisiensi 32,78% (dari 6.534 ppm menjadi 4.392 ppm), 3 *nozzle* mencapai 43,71% (menjadi 3.678 ppm), dan 4 *nozzle* mencapai efisiensi tertinggi sebesar 69,81% (menjadi hanya 1.973 ppm). Pola peningkatan efisiensi seiring waktu ini mengindikasikan bahwa pada debit gas buang yang lebih rendah (fase *burn-out*), waktu kontak antara gas dan larutan penyerap di dalam *wet scrubber* menjadi relatif lebih lama, sehingga proses absorpsi CO₂ berlangsung lebih optimal dibandingkan pada fase pembakaran puncak dengan volume gas yang jauh lebih besar.

Untuk melihat kinerja keseluruhan sistem selama periode pengukuran, dihitung pula rata-rata kadar CO₂ dari menit ke-10 hingga menit ke-90 pada setiap kondisi, sebagaimana disajikan pada Tabel 18.

Tabel 3. Efisiensi Penurunan Kadar CO₂ pada Menit ke-90 untuk Setiap Variasi Nozzle

Konfigurasi	Rata-rata CO ₂ (ppm)	Penurunan terhadap Baseline (%)
<i>Pre-Scrubbing</i>	9.273,56	-
<i>Post-Scrubbing 2 Nozzle</i>	7.669,78	17,29
<i>Post-Scrubbing 3 Nozzle</i>	6.905,22	25,54
<i>Post-Scrubbing 4 Nozzle</i>	5.154,89	44,41

Berdasarkan Tabel 3, kadar CO₂ rata-rata mengalami penurunan dari 9.273,56 ppm pada kondisi *pre-scrubbing* menjadi 5.154,89 ppm pada konfigurasi 4 nozzle, atau setara dengan efisiensi penurunan sebesar 44,41%. Sementara itu, konfigurasi 2 nozzle dan 3 nozzle masing-masing hanya mampu menurunkan kadar CO₂ sebesar 17,29% dan 25,54%. Hasil ini menegaskan adanya hubungan yang berbanding lurus antara jumlah nozzle dan efektivitas penyerapan CO₂: semakin banyak titik semprot yang digunakan, semakin luas bidang kontak antara gas buang dan larutan penyerap (*droplet interception*), sehingga transfer massa CO₂ dari fase gas ke fase cair berlangsung lebih efektif.

Secara mekanistik, penurunan kadar CO₂ ini terjadi karena *wet scrubber* bekerja melalui prinsip absorpsi gas ke dalam larutan penyerap, di mana molekul CO₂ berkontak dengan permukaan droplet air yang disemprotkan melalui nozzle, kemudian terlarut dan/atau bereaksi secara kimiawi di dalam larutan tersebut sebelum gas sisa dilepaskan ke atmosfer (Chen *et al.*, 2024; L. Zhao & Liu, 2022). Efisiensi penurunan CO₂ sebesar 44,41% pada konfigurasi 4 nozzle dalam penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *wet scrubber* yang diterapkan bekerja secara efektif dalam menurunkan kadar CO₂ hasil pembakaran sampah. Tingginya efisiensi yang diperoleh didukung oleh beberapa faktor operasional, antara lain jenis laju alir gas buang, ukuran droplet yang dihasilkan nozzle, waktu kontak gas-cair, serta karakteristik dan kadar air sampah yang dibakar. Kombinasi faktor-faktor tersebut, khususnya peningkatan jumlah nozzle yang memperluas bidang kontak antara gas dan larutan penyerap, menjadi faktor utama yang mendorong tercapainya efisiensi penurunan CO₂ yang optimal pada konfigurasi ini.

KESIMPULAN

Konfigurasi empat nozzle menghasilkan konsentrasi CO₂ terukur pada outlet yang paling rendah dibandingkan dengan konfigurasi lainnya yang diuji, dengan rata-rata penurunan konsentrasi sebesar 44,41% relatif terhadap kondisi baseline. Konfigurasi yang sama juga menghasilkan temperatur rata-rata terendah pada tabung purifikasi dan outlet. Oleh karena itu, konfigurasi empat nozzle menunjukkan kinerja terbaik di antara seluruh konfigurasi yang diuji. Namun, karena laju alir gas buang, rasio cairan terhadap gas, dan laju alir massa CO₂ tidak dikuantifikasi, hasil penelitian ini diinterpretasikan sebagai penurunan konsentrasi CO₂ terukur, bukan sebagai penurunan langsung terhadap total emisi massa CO₂.

REFERENSI

Anders, L., Bauer, M., Jeong, S., Schmidt, M., Hakkim, H., Kalamašnikovs, A., Rosewig, E. I., Schade, J., Irsig, R., Ehlert, S., Bendl, J., Saraji-Bozorgzad, M. R., Giocastro, B., Käfer, U., Etzien, U., Buchholz, B., Adam, T., Sklorz, M., Streibel, T., ... Zimmermann, R. (2025). Limited efficiency of wet scrubbers in reducing the

- environmental impact of ship-emitted particles. *Environmental Chemistry Letters*, 23(4), 923–929. <https://doi.org/10.1007/s10311-025-01830-x>
- Balas, M., Lisy, M., Kubicek, J., & Pospisil, J. (n.d.). Syngas Cleaning by Wet Scrubber.
- Chen, T., Deng, L., Li, Y., Li, J., Zhao, X., & Fu, L. (2024). Removal of multiple pollutants in air pollution control devices of a coal-fired boiler installed with a flue gas condensation scrubber. *Journal of Cleaner Production*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139971>
- Domingo, J. L. (2026). Human health risks of waste incinerators: a narrative review of studies on municipal, hazardous and medical waste incineration. *International Journal of Environmental Epidemiology*, 1–11. <https://doi.org/10.55092/ijee20260002>
- Fellner, J., Cai, J., Schwarzböck, T., Hu, S., Long, J., Bai, L., An, Z., Kahr, G., Zhang, H., & Li, X. (2026). Comparative assessment of radiocarbon and balance method for determining biogenic and fossil CO₂ emissions from waste-to-energy plants in Austria and China. *Waste Management*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115621>
- Hu, S., Gao, Y., Feng, G., Hu, F., Liu, C., & Li, J. (2021). Experimental study of the dust-removal performance of a wet scrubber. *International Journal of Coal Science and Technology*, 8(2), 228–239. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00410-y>
- Kim, K. T., Kim, H., Jeong, S., Lee, Y. S., Choi, E., & Kim, J. Y. (2025). Quantification of greenhouse gas emissions from a municipal solid waste incinerator using an uncrewed aerial vehicle. *Environment International*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109396>
- Mahir, S., & Manyele, S. (2023). Assessment of a Multi-Stage Wet Scrubber Performance Based on Characteristics of Scrubbing Solution. *Tanzania Journal of Engineering and Technology*, 42(2), 206–223. <https://doi.org/10.52339/tjet.v42i2.836>
- Maphuhla, N. G., & Oyedeji, O. O. (2025). From Trash to Treasure: Systematic Evaluation of Potential and Efficiency of Waste-to-Energy Incineration for Electricity Generation. *Waste*, 3(4), 39. <https://doi.org/10.3390/waste3040039>
- Maryudi, M., Aktawan, A., & Amelia, S. (2022). Water Scrubber and Zeolite Catalyst for Clean Syngas Production on Biomass Gasification of Bagasse in a Downdraft System. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 11(2), 92–99. <https://doi.org/10.15294/jbat.v11i2.39674>
- Salomone, F., Marocco, P., Ferrario, D., Lanzini, A., Fino, D., Bensaid, S., & Santarelli, M. (2023). Process simulation and energy analysis of synthetic natural gas production from water electrolysis and CO₂ capture in a waste incinerator. *Applied Energy*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121200>
- Zhai, Y., Liu, F., Hu, Y., Wang, L., Lu, X., Yu, Z., Liu, H., & Zhang, R. (2023). Regional CO₂ accounting and market layout of incinerator fly ash management in China. *Science of the Total Environment*, 881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163336>
- Zhao, L., & Liu, J. (2022). Fast real-time measurement method of a wet scrubber on particle purification efficiency with image information entropy analysis. *Building and Environment*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109133>
- Zhao, M., Xue, P., Liu, J., Liao, J., & Guo, J. (2021). A review of removing SO₂ and NO_x by wet scrubbing. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 47). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101451>