

***DEVELOPMENT OF WET SCRUBBER TECHNOLOGY TO IMPROVE ENVIRONMENTAL QUALITY IN AGRO-INDUSTRY***

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI *WET SCRUBBER* UNTUK MENINGKATKAN KUALITAS LINGKUNGAN PADA AGROINDUSTRI**

**Muhammad Arga Hita<sup>\*</sup>, Miftahul Choiron, Leader Firstandika**

Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Kampus Tegal Boto, Jember, Indonesia

Diterima 20 Februari 2026 / Disetujui 30 Maret 2026

***ABSTRACT***

*Biomass combustion in agro-industrial activities can generate various air pollutants, including formaldehyde (HCHO), total volatile organic compounds (TVOC), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and particulate matter (PM), which contribute to environmental pollution and potential health risks. This study aimed to evaluate the effectiveness of wet scrubber technology with different configurations in reducing air pollutant emissions from biomass combustion. Biomass combustion in agro-industrial activities can generate various air pollutants, including formaldehyde (HCHO), total volatile organic compounds (TVOC), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and particulate matter (PM), which contribute to environmental pollution and potential health risks. This study aimed to evaluate the effectiveness of wet scrubber technology with different configurations in reducing air pollutant emissions from biomass combustion. The results showed that the application of wet scrubber technology significantly reduced pollutant concentrations compared with the control treatment ( $p < 0.05$ ). The combined configuration of water sprayer and water trap demonstrated the highest reduction efficiency, decreasing HCHO by 98.02%, TVOC by 96.70%, CO by 98.52%, and CO<sub>2</sub> by 87.77%. In addition, the wet scrubber system also reduced particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) concentrations. Changes in scrubbing water quality were also observed, indicated by variations in pH and an increase in total dissolved solids (TDS) due to the absorption of pollutants during the scrubbing process. These findings indicate that wet scrubber technology, particularly the combined water sprayer and water trap configuration, is an effective approach for reducing air pollutant emissions generated from biomass combustion in agro-industrial processes.*

***Keywords:*** *wet scrubber, biomass combustion, air pollution control, TVOC removal, agro-industrial emissions*

***ABSTRAK***

Proses pembakaran biomassa pada kegiatan agroindustri dapat menghasilkan berbagai polutan udara, seperti formaldehida (HCHO), total *volatile organic compounds* (TVOC), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), serta *particulate matter* (PM), yang berpotensi menurunkan kualitas lingkungan dan berdampak terhadap kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas teknologi *wet scrubber* dengan beberapa konfigurasi dalam mereduksi emisi polutan udara yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan tiga konfigurasi *wet scrubber*, yaitu *water sprayer*, *water trap*, dan kombinasi *water sprayer-water trap*, serta perlakuan kontrol tanpa sistem *scrubber*. Rancangan penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga kali ulangan pada setiap perlakuan. Data dianalisis

---

<sup>\*</sup> Korespondensi Penulis :  
Email: hitama@unej.ac.id

menggunakan analisis varians satu arah (ANOVA) yang dilanjutkan dengan uji Tukey *Honest Significant Difference* (HSD) untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem *wet scrubber* mampu menurunkan konsentrasi polutan secara signifikan dibandingkan perlakuan kontrol ( $p < 0,05$ ). Perlakuan kombinasi *water sprayer* dan *water trap* menunjukkan efisiensi reduksi tertinggi dengan penurunan konsentrasi HCHO sebesar 98,02%, TVOC sebesar 96,70%, CO sebesar 98,52%, dan CO<sub>2</sub> sebesar 87,77%. Selain itu, sistem *wet scrubber* juga mampu menurunkan konsentrasi *particulate matter* (PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>). Proses *scrubbing* juga menyebabkan perubahan kualitas air yang ditunjukkan oleh perubahan nilai pH dan peningkatan *total dissolved solids* (TDS) akibat penyerapan polutan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi *wet scrubber*, khususnya konfigurasi kombinasi *water sprayer* dan *water trap*, berpotensi menjadi teknologi pengendalian emisi yang efektif untuk menurunkan polutan udara dari proses pembakaran biomassa pada sektor agroindustri.

**Kata kunci :** *wet scrubber*, pembakaran biomassa, pengendalian pencemaran udara, *TVOC removal*, emisi agroindustri

## PENDAHULUAN

Sektor agroindustri di Indonesia memiliki peran penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi nasional. Agroindustri berkontribusi dalam meningkatkan nilai tambah produk pertanian, menciptakan lapangan kerja, serta mendorong pembangunan wilayah (Putri, Indraswari, Wulandari, and Juniarmoko, 2022). Seiring meningkatnya permintaan konsumen terhadap produk olahan pertanian yang beragam dan berkualitas tinggi, pelaku usaha agroindustri—baik usaha kecil dan menengah maupun industri skala besar—terus meningkatkan kapasitas produksi dan kemampuan teknologinya (Huang et al., 2026). Namun, perkembangan pesat tersebut juga menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan, terutama pencemaran udara akibat proses pembakaran dalam kegiatan produksi (Nursabrina et al., 2021).

Banyak agroindustri masih mengandalkan pembakaran biomassa tradisional sebagai sumber panas, proses pengeringan, atau bahan bakar pengolahan produk (Musaid, Valsala, Halder, and Tiwari, 2026). Biomassa seperti ampas tebu, ranting pohon, serbuk kayu, dan residu pertanian lainnya mudah diperoleh dan berbiaya rendah, namun sistem pembakarannya cenderung tidak efisien sehingga menghasilkan polutan udara dalam jumlah besar (Rifai, Rachmat, and Prasetyo, 2021). Pembakaran biomassa menghasilkan berbagai gas berbahaya yang dilepaskan ke atmosfer, termasuk formaldehida (HCHO), total *Volatile Organic Compounds* (TVOC), *Particulate matter* (PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Naufaldi et al., 2022).

Emisi tersebut dapat menurunkan kualitas udara dan membahayakan kesehatan manusia. Partikulat halus (PM<sub>2.5</sub>) mampu menembus sistem pernapasan dan berkontribusi terhadap penyakit pernapasan serta kardiovaskular (Shin et al., 2025). Senyawa organik volatil berperan dalam pembentukan ozon permukaan dan kabut asap, sementara CO<sub>2</sub> berkontribusi terhadap percepatan perubahan iklim global (Supriyadi et al., 2021). Pada banyak usaha kecil dan menengah, tingkat kesadaran akan risiko kesehatan akibat polusi udara ini masih rendah, ditambah keterbatasan teknologi pengendalian emisi yang terjangkau (Nursabrina et al., 2021).

Salah satu teknologi yang menjanjikan untuk pengendalian emisi adalah *wet scrubber*, yaitu perangkat yang memanfaatkan semprotan cairan untuk menangkap polutan udara. Dalam sistem *wet scrubber*, gas buang bersentuhan dengan butiran air halus sehingga polutan dapat ditangkap melalui mekanisme absorpsi, difusi, dan tumbukan inersia sebelum dipisahkan dari aliran gas (Supriyadi et al., 2021). Teknologi ini relatif sederhana dan telah banyak diterapkan di industri besar, namun

penerapannya pada sektor agroindustri, khususnya skala kecil dan menengah di Indonesia, masih sangat terbatas (Nursabrina et al., 2021).

Sebagian besar desain *wet scrubber* yang ada belum sepenuhnya sesuai dengan karakteristik emisi pembakaran biomassa agroindustri yang memiliki variasi ukuran partikel, kadar air tinggi, serta komposisi gas yang kompleks (Rifai et al., 2021). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan sistem *wet scrubber* yang disesuaikan dengan kebutuhan agroindustri melalui tiga konfigurasi, yaitu *Water sprayer wet scrubber*, *Water trap wet scrubber*, serta sistem kombinasi keduanya (Zhao, You, Liu, and Chen, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem *wet scrubber* yang praktis dan terjangkau bagi agroindustri skala kecil hingga menengah, mengevaluasi efektivitas masing-masing konfigurasi dalam menurunkan konsentrasi HCHO, TVOC, PM2.5, PM10, CO, dan CO<sub>2</sub>, serta memberikan rekomendasi penerapan teknologi *wet scrubber* guna mendukung praktik industri berkelanjutan di Indonesia.

## METODE PENELITIAN

### Bahan dan Alat

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Industri dan Rekayasa Lingkungan, Departemen Teknologi Agroindustri, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, pada periode Desember 2024 hingga Juni 2025. Peralatan yang digunakan meliputi *Water sprayer* bertekanan tinggi (High Pressure Cleaner QL-1200, 105 Bar), blower dengan kecepatan putaran 3000 rpm, pendeteksi kualitas udara 6-in-1, pH meter digital, dan TDS meter digital. Peralatan fabrikasi *wet scrubber* meliputi mesin bor, gerinda, lem tembak, pipa PVC, dan lembaran akrilik. Air bersih digunakan sebagai media *scrubbing*, sedangkan bahan bakar biomassa berupa ampas tebu yang didapatkan dari sisa pedagang es tebu di Jalan Kalimantan, Kabupaten Jember yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Biomassa ampas tebu

## Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan pendekatan *contact scrubbing*, yaitu proses kontak langsung antara gas buang hasil pembakaran biomassa dengan media cair (*air scrubbing*) untuk menangkap polutan udara (Ahmed et al., 2025; Supriyadi et al., 2021). Rancangan percobaan yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan satu faktor perlakuan berupa konfigurasi sistem *wet scrubber*. Perlakuan yang diuji terdiri atas empat tingkat, yaitu: P0 (kontrol tanpa *wet scrubber*), P1 (*wet scrubber* tipe *Water sprayer*), P2 (*wet scrubber* tipe *Water trap*), dan P3 (kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap*). Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali sehingga diperoleh total 12 unit percobaan (Tabel 1).

Data hasil pengukuran konsentrasi polutan udara kemudian dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA) satu arah pada taraf signifikansi 5%. Apabila hasil analisis menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey HSD untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan (Rak-mardyła et al., 2012; Sudha and Mohapatra, 2022).

Tabel 1. Rancangan Percobaan

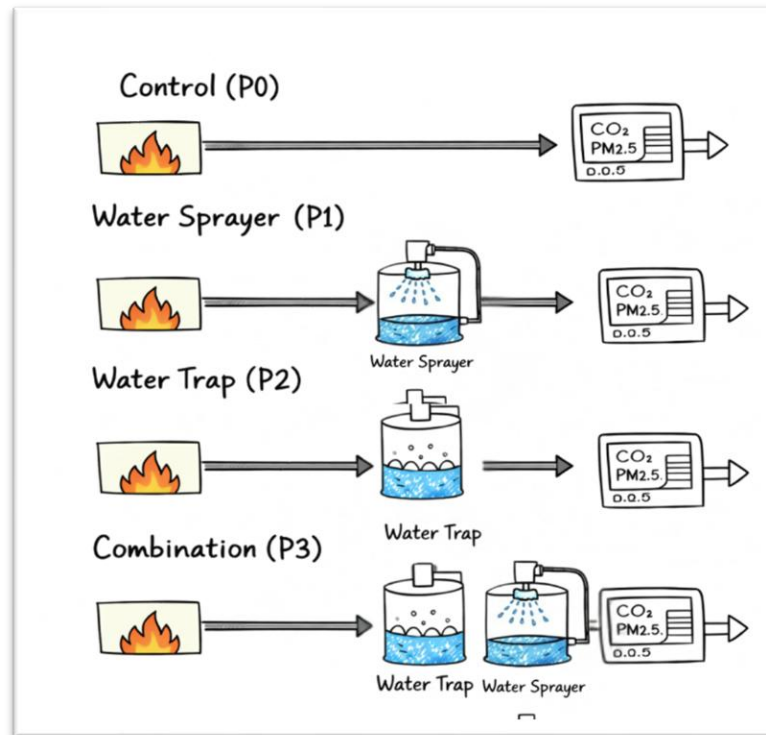
Kode Perlakuan	Deskripsi Perlakuan
P0	Pembakaran biomassa tanpa sistem <i>wet scrubber</i> (kontrol)
P1	Sistem <i>wet scrubber</i> tipe <i>Water sprayer</i>
P2	Sistem <i>wet scrubber</i> tipe <i>Water trap</i>
P3	Kombinasi sistem <i>Water sprayer</i> dan <i>Water trap</i>

## Pelaksanaan Penelitian

Percobaan diawali dengan menyiapkan biomassa yang terdiri dari 200 gram ampas tebu. Biomassa tersebut kemudian dibakar di dalam ruang pembakaran selama 10 menit untuk menghasilkan gas buang yang berpotensi mengandung berbagai polutan udara. Ampas tebu sebagai biomassa lignoselulosa diketahui dapat dimanfaatkan melalui proses termal seperti pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi untuk menghasilkan energi maupun produk gas (Kamboj et al., 2024). Oleh karena itu, proses pembakaran yang dilakukan dalam penelitian ini digunakan sebagai pendekatan untuk menghasilkan emisi gas buang dari biomassa.

Gas hasil pembakaran selanjutnya dialirkan menuju sistem pengujian menggunakan blower dengan kecepatan putaran 3000 rpm (*rotation per minute*). Pada perlakuan kontrol (P0), gas buang dialirkan langsung menuju titik pengukuran tanpa melalui sistem *wet scrubber*. Pada perlakuan P1, gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber* tipe *Water sprayer* yang menghasilkan butiran air bertekanan tinggi untuk meningkatkan kontak antara gas hasil pembakaran dan cairan. Pada perlakuan P2, gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber* tipe *Water trap* yang memanfaatkan kontak antara gas buang dan media air untuk menangkap polutan. Pada perlakuan P3, gas buang dialirkan melalui sistem kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* sehingga proses penangkapan polutan berlangsung melalui dua tahap kontak gas-cair.

Air bersih sebanyak  $\pm 7$  liter digunakan sebagai media *scrubbing* pada setiap siklus perlakuan. Gas yang keluar dari sistem *wet scrubber* kemudian diukur menggunakan alat pendeteksi kualitas udara tipe 6-in-1 untuk menentukan konsentrasi HCHO, TVOC, PM2.5, PM10, CO, dan CO<sub>2</sub> (Gambar 2). Setelah proses pengujian selesai, sampel air *scrubbing* diambil untuk dianalisis kualitasnya dengan mengukur nilai pH menggunakan pH meter digital dan *total dissolved solids* (TDS) menggunakan TDS meter digital. Setiap perlakuan dilakukan sebanyak tiga kali ulangan untuk memperoleh data yang representatif.

Gambar 2. Skema *wet scrubber* pada setiap perlakuan

### Variabel yang Diamati

Variabel yang diamati meliputi konsentrasi formaldehida (HCHO) yang dapat menyebabkan gangguan pernafasan hingga memicu terjadi kanker pada kesehatan manusia (Mendoza-rodríguez, 2025), sedangkan dampak terhadap lingkungan ialah peningkatan efek gas rumah kaca (Fan et al., 2023), *total Volatile Organic Compounds* (TVOC) yang berkontribusi untuk degradasi kualitas udara dengan cara meningkatkan beban pencemaran udara; menimbulkan bau tidak sedap; dan menjadi indikator adanya senyawa organik reaktif di udara (Schicklin et al., 2026), *Particulate matter* (PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>) merupakan komponen utama degradasi kualitas udara yang dipengaruhi oleh kombinasi sumber antropogenik dan alami selain itu berdampak signifikan terhadap peningkatan mortalitas, terutama akibat penyakit kardiovaskuler karena PM merupakan polutan udara yang memiliki merupakan komponen utama penurunan kualitas udara yang berasal dari sumber antropogenik maupun alami. Partikel ini berdampak signifikan terhadap peningkatan mortalitas, terutama akibat penyakit kardiovaskuler, karena memiliki ukuran aerodinamis yang sangat kecil, yaitu  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) dan  $\leq 10 \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>), sehingga mampu menembus hingga ke bagian terdalam paru-paru (*alveoli*) (Psistaki et al., 2023), karbon monoksida (CO) mengonsumsi radikal OH, sehingga memperlambat proses oksidasi senyawa lain (misalnya CH<sub>4</sub>) yang berimplikasi pada peningkatan umur gas rumah kaca dan potensi penguatan efek iklim secara tidak langsung (Tsai et al., 2025), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), serta kualitas air *scrubbing* yang meliputi pH dan *total dissolved solids* (TDS) (Samsugi and Suwanto, 2020). Data dianalisis menggunakan ANOVA satu arah dan uji lanjut Tukey HSD untuk menentukan perbedaan signifikan antar perlakuan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem *wet scrubber* mampu menurunkan konsentrasi polutan gas yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa agroindustri. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa penggunaan *wet scrubber* efektif dalam mereduksi berbagai parameter polutan, seperti HCHO, TVOC, CO, dan CO<sub>2</sub> (Bianchini, Pellegrini, Rossi, and Saccani, 2018). Dengan demikian, temuan pada penelitian ini memperkuat bukti bahwa teknologi *wet scrubber* merupakan metode yang efektif dalam pengendalian emisi gas hasil pembakaran biomassa.

Penurunan konsentrasi polutan pada penelitian ini terjadi pada seluruh parameter yang diamati, di mana perlakuan menggunakan *wet scrubber* menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan kondisi kontrol tanpa perlakuan. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan secara statistik, dilakukan analisis varians (ANOVA) satu arah yang hasilnya disajikan pada bagian berikut.

### Analisis Statistik Pengaruh *Wet scrubber* terhadap Polutan Gas

Hasil uji ANOVA satu arah menunjukkan bahwa penerapan *wet scrubber* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap seluruh parameter gas yang diamati. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *p-value* yang lebih kecil dari 0,05 pada semua parameter, sehingga terdapat perbedaan nyata antara perlakuan kontrol dan perlakuan menggunakan *wet scrubber*.

Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang juga melaporkan bahwa sistem *wet scrubber* efektif dalam menurunkan kandungan polutan melalui proses penyerapan dan reaksi kimia antara gas dan fase cair. Selain itu, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa proses pengolahan berbasis *wet scrubber* yang dikombinasikan dengan proses lanjutan mampu meningkatkan efisiensi penyisihan senyawa organik seperti COD dan fenol secara signifikan (Gonca and Dizge, 2022). Dengan demikian, hasil penelitian ini semakin memperkuat bahwa teknologi *wet scrubber* berperan penting dalam pengendalian pencemaran udara maupun limbah hasil proses pembakaran. Ringkasan hasil uji ANOVA disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Uji ANOVA Satu Arah

Parameter	F-hitung	p-value	Keterangan
HCHO	129,16	0,000	Berbeda signifikan
TVOC	60,72	0,000	Berbeda signifikan
CO	862,35	0,000	Berbeda signifikan
CO <sub>2</sub>	25,17	0,010	Berbeda signifikan

Keterangan: perbedaan signifikan pada  $\alpha = 0,05$

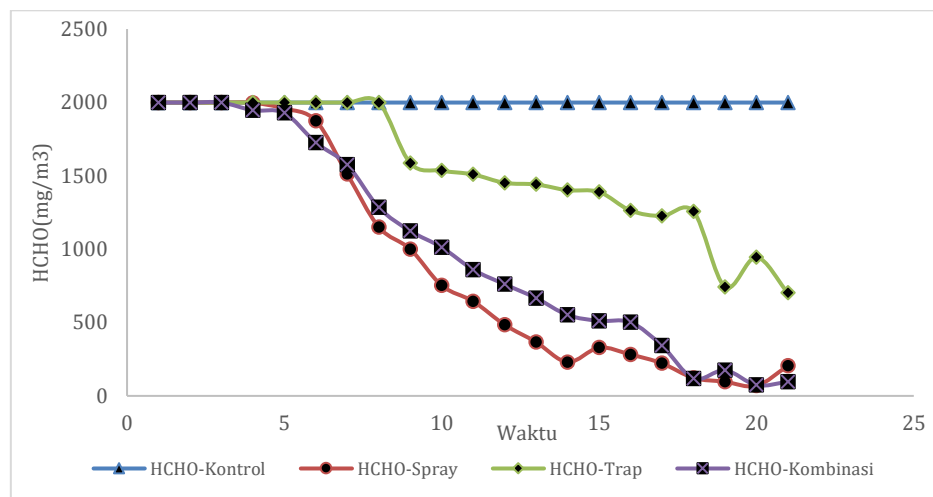
Nilai *p-value* yang lebih kecil dari 0,05 pada seluruh parameter menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang nyata antara perlakuan kontrol dan perlakuan menggunakan *wet scrubber* (Hassan et al., 2024; Kao et al., 2008; Kwak, 2023). Dengan demikian, analisis dilanjutkan menggunakan uji Tukey HSD untuk mengetahui kelompok perlakuan yang berbeda secara signifikan (Chaurasia and Bansal, 2025).

### Reduksi Formaldehida (HCHO)

Formaldehida (HCHO) merupakan salah satu senyawa organik volatil yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa dan berpotensi menurunkan kualitas udara apabila dilepaskan ke lingkungan (Office of Chemical Safety and Pollution Prevention, 2025). Berdasarkan hasil analisis statistik yang disajikan pada Tabel 2, parameter HCHO menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan

( $p < 0,05$ ). Nilai rata-rata konsentrasi HCHO pada masing-masing perlakuan disajikan pada Tabel 3. Tabel 3. Konsentrasi HCHO ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) dan persentase penurunannya

Perlakuan	Rerata HCHO ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	% Pengurangan
Kontrol	0.81	-
<i>Water sprayer</i>	0.16	80.25%
<i>Water trap</i>	0.09	88.89%
Kombinasi <i>sprayer + trap</i>	0.02	98.02%



Gambar 3. Konsentrasi HCHO seluruh perlakuan

Berdasarkan data pada Tabel 3, konsentrasi HCHO tertinggi terdapat pada perlakuan kontrol dengan nilai sebesar  $0,81 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*, konsentrasi HCHO mengalami penurunan yang signifikan pada seluruh perlakuan. Sistem *Water sprayer* menurunkan konsentrasi HCHO menjadi  $0,16 \text{ mg}/\text{m}^3$  dengan efisiensi reduksi sebesar 80,25%. Perlakuan *Water trap* menghasilkan konsentrasi HCHO sebesar  $0,09 \text{ mg}/\text{m}^3$  dengan persentase penurunan sebesar 88,89%. Penurunan terbesar diperoleh pada sistem kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* dengan konsentrasi HCHO sebesar  $0,02 \text{ mg}/\text{m}^3$  atau efisiensi reduksi sebesar 98,02%, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses scrubbing mampu menghilangkan formaldehida dari aliran gas dengan efisiensi mencapai lebih dari 95% (Al-faliti et al., 2022; Talaiekhosani et al., 2016).

Perubahan konsentrasi HCHO selama proses pengujian pada masing-masing perlakuan ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik tersebut memperlihatkan penurunan konsentrasi HCHO secara bertahap sejak awal hingga akhir proses, dimana perlakuan kombinasi menunjukkan laju penurunan yang lebih cepat dan mencapai konsentrasi terendah dibandingkan perlakuan lainnya, sedangkan perlakuan kontrol cenderung menunjukkan nilai yang relatif stabil.

Perbedaan nilai yang ditampilkan antara Tabel 3 dan Gambar 3 perlu dipahami dalam konteks penyajian data yang berbeda. Nilai pada Tabel 3 merepresentasikan konsentrasi HCHO pada kondisi akhir pengujian yang telah mencapai kestabilan, sehingga digunakan sebagai dasar dalam analisis kuantitatif dan statistik. Sementara itu, Gambar 3 menggambarkan perubahan konsentrasi HCHO secara bertahap sejak awal hingga akhir proses scrubbing. Dengan demikian, grafik tersebut lebih mencerminkan dinamika penurunan konsentrasi selama proses berlangsung, sedangkan tabel menunjukkan kondisi representatif sistem setelah mencapai kinerja optimal.

Penurunan konsentrasi HCHO terjadi karena adanya proses kontak antara gas buang dan media air

di dalam sistem *wet scrubber* sehingga meningkatkan peluang penyerapan senyawa polutan. Senyawa karbonil seperti formaldehida diketahui memiliki kelarutan tinggi dalam air sehingga dapat dihilangkan secara efektif melalui proses *wet scrubbing* (Padoan et al., 2024). Sistem *Water sprayer* menghasilkan tetesan air berukuran kecil yang memperbesar luas permukaan kontak gas-cair (Chin et al., 2023; Hassan et al., 2024), sedangkan sistem *Water trap* memperpanjang waktu kontak gas dengan media air sehingga meningkatkan peluang penyerapan senyawa polutan. Kombinasi kedua mekanisme tersebut meningkatkan efisiensi perpindahan massa dari fase gas ke fase cair sehingga proses penyerapan formaldehida yang bersifat mudah larut dalam air menjadi lebih efektif (Supriyadi et al., 2021).

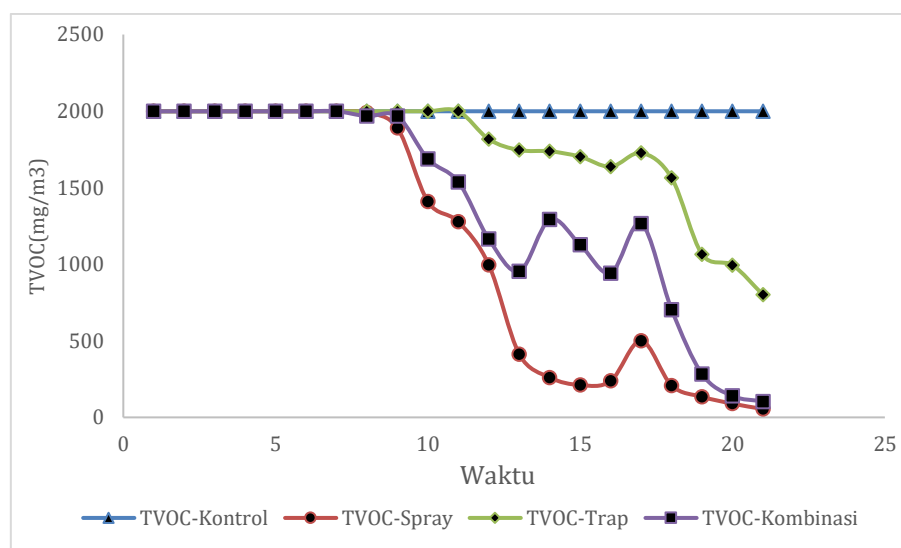
Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa formaldehida dapat ditangkap secara efektif melalui proses absorpsi (Si et al., 2021) dalam sistem *wet scrubber* karena sifat kelarutannya yang relatif tinggi dalam air (Wang et al., 2024a). Oleh karena itu, penerapan sistem *wet scrubber* dengan konfigurasi kombinasi berpotensi menjadi metode yang efektif dalam mengurangi emisi formaldehida dari proses pembakaran biomassa.

### Reduksi Total *Volatile Organic Compounds* (TVOC)

Total *Volatile Organic Compounds* (TVOC) merupakan kelompok senyawa organik yang mudah menguap dan berkontribusi terhadap pencemaran udara serta penurunan kualitas lingkungan (Kahar et al., 2022; Liu et al., 2025). Berdasarkan hasil analisis statistik yang disajikan pada Tabel 2, parameter TVOC menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan ( $p < 0,05$ ). Nilai rata-rata konsentrasi TVOC pada masing-masing perlakuan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konsentrasi TVOC (mg/m<sup>3</sup>) dan persentase penurunannya

Perlakuan	Rerata TVOC (mg/m <sup>3</sup> )	% Pengurangan
Kontrol	1.82	-
<i>Water sprayer</i>	0.21	88.46%
<i>Water trap</i>	0.12	93.41%
Kombinasi <i>sprayer + trap</i>	0.06	96.70%



Gambar 4. Konsentrasi TVOC seluruh perlakuan

Berdasarkan data pada Tabel 4, konsentrasi TVOC tertinggi terdapat pada perlakuan kontrol

dengan nilai sebesar 1,82 mg/m<sup>3</sup>. Setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*, konsentrasi TVOC mengalami penurunan yang signifikan pada seluruh perlakuan. Sistem *Water sprayer* menurunkan konsentrasi TVOC menjadi 0,21 mg/m<sup>3</sup> dengan efisiensi reduksi sebesar 88,46%. Perlakuan *Water trap* menghasilkan konsentrasi TVOC sebesar 0,12 mg/m<sup>3</sup> dengan persentase penurunan sebesar 93,41%. Penurunan terbesar diperoleh pada sistem kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* dengan konsentrasi TVOC sebesar 0,06 mg/m<sup>3</sup> atau efisiensi reduksi sebesar 96,70%.

Perbandingan konsentrasi TVOC pada setiap perlakuan juga dapat diamati secara visual pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan tren penurunan konsentrasi TVOC secara bertahap selama proses pengujian, dimana perlakuan kombinasi menghasilkan penurunan paling cepat dan mencapai konsentrasi terendah dibandingkan perlakuan lainnya, sedangkan perlakuan kontrol menunjukkan kecenderungan nilai yang relatif stabil selama proses berlangsung (Giustacori and Brunazzi, 2025a).

Nilai konsentrasi yang disajikan pada Tabel 4 merupakan hasil pengolahan data pada fase akhir pengujian, ketika sistem telah menunjukkan kondisi yang relatif stabil, sehingga digunakan sebagai representasi kinerja masing-masing perlakuan. Berbeda dengan itu, Gambar 4 menampilkan fluktuasi konsentrasi TVOC secara kontinu selama proses berlangsung, yang menggambarkan *respon* sistem terhadap proses *scrubbing* sejak awal hingga mencapai kondisi stabil. Oleh karena itu, perbedaan nilai antara tabel dan grafik mencerminkan perbedaan sudut pandang analisis, yaitu antara kondisi akhir sistem dan dinamika proses yang terjadi selama pengujian.

Penurunan konsentrasi TVOC terjadi karena adanya proses kontak antara gas buang dan media air dalam sistem *wet scrubber* (Giustacori and Brunazzi, 2025b). Sistem *Water sprayer* menghasilkan tetesan air berukuran kecil yang memperbesar luas permukaan kontak gas-cair, sedangkan sistem *Water trap* memperpanjang waktu kontak gas dengan media air sehingga peluang penyerapan senyawa volatil menjadi lebih besar. Kombinasi kedua mekanisme tersebut meningkatkan efisiensi perpindahan massa dari fase gas ke fase cair sehingga penyerapan senyawa VOC menjadi lebih optimal (Giustacori and Brunazzi, 2025a).

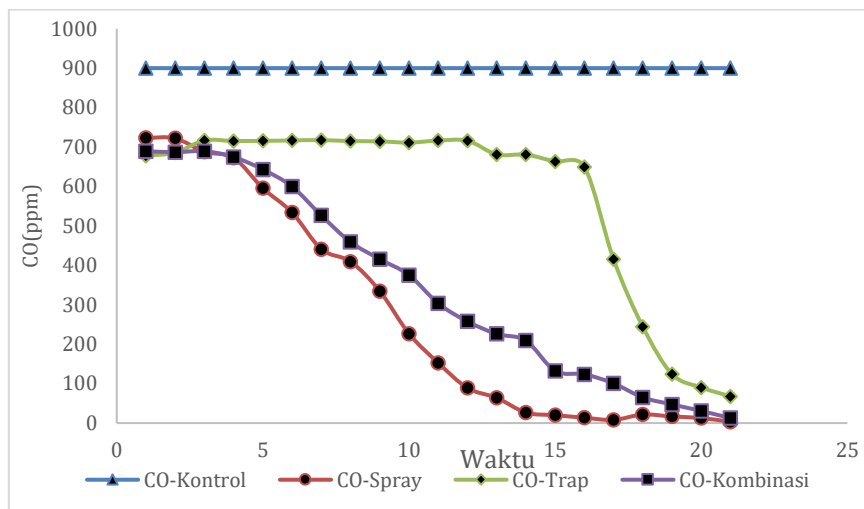
Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa *wet scrubber* efektif digunakan untuk mengurangi emisi VOC melalui mekanisme absorpsi dan difusi pada permukaan cairan (Wang et al., 2024b). Namun demikian, efisiensi penghilangan VOC dipengaruhi oleh sifat kimia senyawa, seperti polaritas (Linares-hern et al., 2023), kelarutan dalam air, serta kondisi operasi sistem *scrubber* yang digunakan (Fadhilah et al., 2022; Nursabrina et al., 2021).

### Reduksi Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) merupakan gas beracun yang dihasilkan dari proses pembakaran tidak sempurna bahan bakar berbasis karbon. Berdasarkan hasil analisis statistik yang disajikan pada Tabel 2, parameter CO menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan ( $p < 0,05$ ). Nilai rata-rata konsentrasi CO pada setiap perlakuan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Konsentrasi CO (mg/m<sup>3</sup>) dan persentase penurunannya

Perlakuan	Rerata CO (ppm)	% Pengurangan
Kontrol	15.15	-
<i>Water sprayer</i>	3.67	75.78%
<i>Water trap</i>	3.10	79.53%
Kombinasi <i>sprayer + trap</i>	0.22	98.52%



Gambar 5. Konsentrasi CO seluruh perlakuan

Berdasarkan data pada Tabel 5, konsentrasi CO tertinggi terdapat pada perlakuan kontrol dengan nilai sebesar 15,15 mg/m<sup>3</sup>. Setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*, konsentrasi CO mengalami penurunan yang cukup signifikan pada seluruh perlakuan. Sistem *Water sprayer* menurunkan konsentrasi CO menjadi 3,67 mg/m<sup>3</sup> dengan efisiensi reduksi sebesar 75,78%. Perlakuan *Water trap* menghasilkan konsentrasi CO sebesar 3,10 mg/m<sup>3</sup> dengan persentase penurunan sebesar 79,53%. Penurunan terbesar diperoleh pada sistem kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* dengan konsentrasi CO sebesar 0,22 mg/m<sup>3</sup> atau efisiensi reduksi sebesar 98,52%, hal ini selaras dengan penelitian terdahulu dimana efisiensi penghilangan dapat melebihi 90% tergantung desain scrubber dan kondisi operasi (Sharif et al., 2021a).

Perbandingan konsentrasi CO pada setiap perlakuan juga dapat diamati secara visual pada Gambar 5. Grafik menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi CO berlangsung secara dinamis dengan kecenderungan penurunan yang lebih tajam pada perlakuan kombinasi, sedangkan perlakuan kontrol mempertahankan konsentrasi yang relatif konstan sepanjang waktu pengujian.

Nilai yang tercantum pada Tabel 5 diperoleh dari kondisi ketika sistem telah mencapai kestabilan operasional, sehingga mencerminkan kemampuan akhir masing-masing perlakuan dalam menurunkan konsentrasi CO. Sebaliknya, Gambar 5 menggambarkan variasi konsentrasi CO selama proses berlangsung, termasuk fase awal ketika sistem belum mencapai keseimbangan. Oleh karena itu, perbedaan nilai antara keduanya mencerminkan perbedaan tahap pengamatan, yaitu antara kondisi *transien* dan kondisi stabil dari sistem *wet scrubber*.

Penurunan konsentrasi CO terjadi karena adanya interaksi antara fase gas dan cair dalam sistem *wet scrubber* (Giustacori and Brunazzi, 2025a; Oh et al., 2024). Sistem *Water sprayer* menghasilkan tetesan air yang meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan cairan, sedangkan sistem *Water trap* memperpanjang waktu kontak aliran gas dengan media air (Lanjekar and Panwar, 2025). Kondisi tersebut meningkatkan proses perpindahan massa sehingga peluang penangkapan CO oleh media air menjadi lebih besar (Rifai et al., 2021). Selain melalui absorpsi fisik, CO juga dapat mengalami reaksi kimia dalam cairan *scrubbing* (Lu et al., 2024) yang menghasilkan senyawa lain seperti CO<sub>2</sub>, bikarbonat, dan karbonat selama proses berlangsung (Piccoli et al., 2026).

Meskipun kelarutan CO dalam air relatif rendah, proses kontak gas-cair yang berlangsung secara kontinu dalam sistem *wet scrubber* mampu menurunkan konsentrasi CO secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi mekanisme *Water sprayer* dan *Water trap* dapat

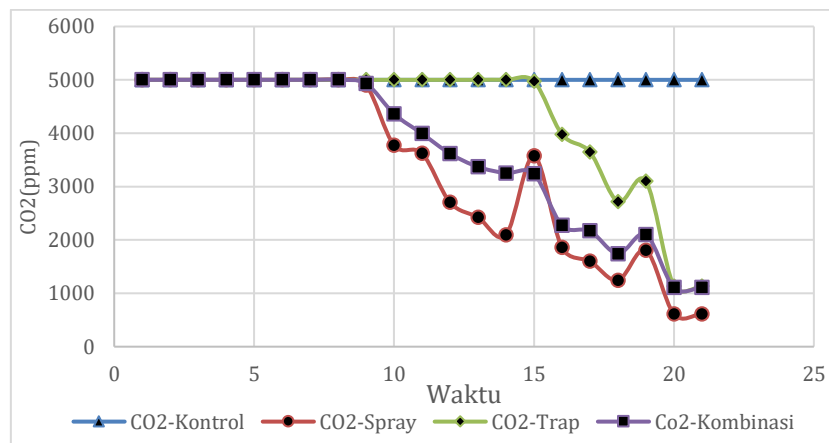
meningkatkan efektivitas proses penyerapan gas sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara (Hamzah et al., 2022).

### Reduksi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan salah satu gas hasil pembakaran biomassa yang berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Berdasarkan hasil analisis statistik yang disajikan pada Tabel 2, parameter CO<sub>2</sub> menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan ( $p < 0,05$ ). Nilai rata-rata konsentrasi CO<sub>2</sub> pada setiap perlakuan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Konsentrasi CO<sub>2</sub> (ppm) dan persentase pengurangannya

Perlakuan	Rerata CO <sub>2</sub> (ppm)	% Pengurangan
<i>Kontrol</i>	551.85	-
<i>Water sprayer</i>	255.74	53.65%
<i>Water trap</i>	248.11	55.04%
<i>Kombinasi sprayer + trap</i>	67.33	87.77%



Gambar 6. Konsentrasi CO<sub>2</sub> seluruh perlakuan

Berdasarkan data pada Tabel 6, konsentrasi CO<sub>2</sub> tertinggi terdapat pada perlakuan kontrol dengan nilai sebesar 551,85 ppm. Setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*, konsentrasi CO<sub>2</sub> mengalami penurunan pada seluruh perlakuan. Sistem *Water sprayer* menurunkan konsentrasi CO<sub>2</sub> menjadi 255,74 ppm dengan efisiensi reduksi sebesar 53,65%. Perlakuan *Water trap* menghasilkan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 248,11 ppm dengan persentase penurunan sebesar 55,04%. Penurunan terbesar diperoleh pada sistem kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 67,33 ppm atau efisiensi reduksi sebesar 87,77%.

Perbandingan konsentrasi CO<sub>2</sub> pada setiap perlakuan juga dapat diamati secara visual pada Gambar 6. Grafik menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> berlangsung secara bertahap dengan kecenderungan yang lebih landai dibandingkan polutan lainnya, yang mengindikasikan karakteristik CO<sub>2</sub> yang lebih sulit diserap, meskipun perlakuan kombinasi tetap menunjukkan performa paling efektif dalam menurunkan konsentrasi gas tersebut.

Berbeda dengan polutan lain yang memiliki kelarutan tinggi, nilai pada Tabel 6 merepresentasikan kondisi akhir sistem setelah proses kontak gas-cair berlangsung cukup lama hingga mencapai keseimbangan relatif. Sementara itu, Gambar 6 memperlihatkan respons sistem sejak awal proses hingga mendekati kondisi tersebut, termasuk fase dimana efisiensi penyerapan masih terbatas. Oleh

karena itu, variasi nilai antara tabel dan grafik mencerminkan perbedaan karakteristik penyerapan CO<sub>2</sub> serta tahapan proses yang diamati, bukan adanya perbedaan data yang tidak konsisten.

Penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> terjadi karena adanya interaksi antara gas buang dan media air dalam sistem *wet scrubber*. Proses penyemprotan air pada sistem *Water sprayer* meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan cairan (Bhattacharyya and Miller, 2017), sedangkan sistem *Water trap* memperpanjang waktu kontak aliran gas dengan media air sehingga meningkatkan peluang terjadinya penyerapan gas oleh cairan. Kombinasi kedua mekanisme tersebut meningkatkan intensitas kontak gas-cair (Borhani et al., 2024) sehingga proses perpindahan massa menjadi lebih efektif (Chen et al., 2024).

Selain itu, sistem *wet scrubber* dengan konfigurasi *multi-stage* atau kombinasi tahapan kontak gas-cair diketahui mampu meningkatkan efisiensi penghilangan polutan gas dibandingkan sistem satu tahap. Kontak gas-cair yang lebih intensif memungkinkan sebagian CO<sub>2</sub> terlarut dalam air *scrubbing* serta meningkatkan efisiensi penangkapan gas selama proses berlangsung (Baloyi et al., 2024).

Meskipun *wet scrubber* bukan teknologi utama yang dirancang khusus untuk penangkapan CO<sub>2</sub>, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem tersebut tetap mampu memberikan kontribusi dalam menurunkan konsentrasi CO<sub>2</sub> melalui proses absorpsi dan perpindahan massa selama kontak gas-cair berlangsung (Ziobrowski and Rotkegel, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan intensitas kontak antara gas buang dan media cair dapat meningkatkan efektivitas pengendalian emisi gas dari proses pembakaran biomassa (Suo et al., 2025; Supriyadi et al., 2021).

### Ringkasan Uji Tukey HSD

Untuk mengetahui perbedaan signifikan antar perlakuan secara lebih rinci, dilakukan uji lanjut menggunakan metode *Tukey Honest Significant Difference* (HSD). Hasil uji Tukey HSD untuk seluruh parameter polutan yang diamati disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai Rata-rata Konsentrasi Polutan Gas dan Kelompok Tukey HSD

Perlakuan	HCHO (mg/m <sup>3</sup> )	TVOC (mg/m <sup>3</sup> )	CO (mg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (ppm)
Kontrol	0,81 <sup>b</sup>	1,82 <sup>b</sup>	15,15 <sup>b</sup>	551,85 <sup>b</sup>
<i>Water sprayer</i>	0,16 <sup>a</sup>	0,21 <sup>a</sup>	3,67 <sup>a</sup>	255,74 <sup>a</sup>
<i>Water trap</i>	0,09 <sup>a</sup>	0,12 <sup>a</sup>	3,10 <sup>a</sup>	248,11 <sup>a</sup>
Kombinasi	0,02 <sup>a</sup>	0,06 <sup>a</sup>	0,22 <sup>a</sup>	67,33 <sup>a</sup>

Keterangan: Nilai dengan huruf superskrip yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey HSD pada  $\alpha = 0,05$ .

Hasil uji Tukey HSD tersebut memperkuat temuan bahwa penerapan *wet scrubber* memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan konsentrasi polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa. Berdasarkan hasil uji Tukey HSD pada Tabel 7, perlakuan kontrol menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan seluruh perlakuan yang menggunakan sistem *wet scrubber* ( $p < 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi *wet scrubber* secara nyata mampu menurunkan konsentrasi polutan gas yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa (Sharif et al., 2021b).

Namun demikian, antar perlakuan yang menggunakan sistem *wet scrubber*, yaitu *Water sprayer*, *Water trap*, dan kombinasi *Water sprayer-Water trap* tidak menunjukkan perbedaan signifikan secara statistik ( $p > 0,05$ ). Meskipun demikian, secara deskriptif perlakuan kombinasi menunjukkan nilai konsentrasi polutan yang lebih rendah dibandingkan perlakuan lainnya.

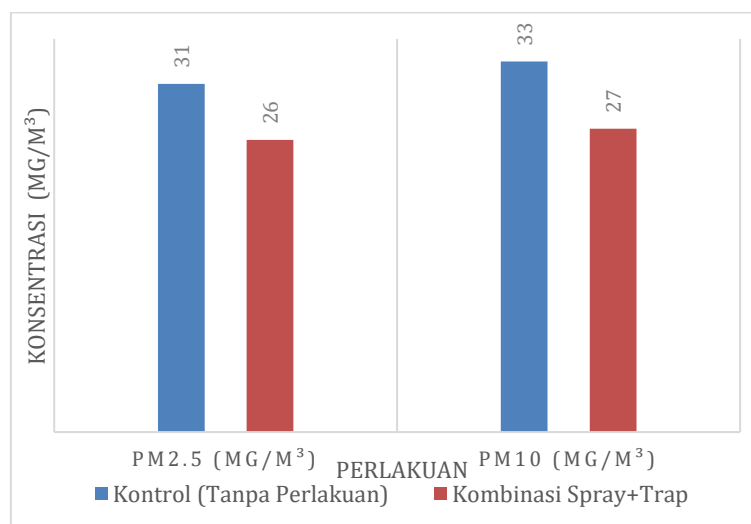
Hasil ini mengindikasikan bahwa seluruh konfigurasi *wet scrubber* yang digunakan dalam

penelitian memiliki kemampuan yang relatif sama dalam mereduksi polutan udara. Penurunan konsentrasi polutan tersebut terjadi karena adanya proses kontak antara gas buang dan media cair dalam sistem *scrubber* yang memungkinkan terjadinya proses absorpsi dan perpindahan massa dari fase gas ke fase cair selama proses berlangsung (Sharif et al., 2021b; Supriyadi et al., 2021). Selain itu, peningkatan intensitas kontak gas-cair pada sistem *multi-stage scrubber* juga diketahui dapat meningkatkan efisiensi penangkapan polutan gas dan partikel selama proses pengolahan emisi berlangsung (Baloyi et al., 2024; Chen et al., 2024).

### Reduksi *Particulate matter* (PM2.5 dan PM10)

*Particulate matter* (PM) merupakan partikel padat atau cair berukuran sangat kecil yang dapat terbentuk dari proses pembakaran biomassa dan berpotensi menurunkan kualitas udara serta berdampak pada kesehatan manusia. Berdasarkan hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 7, konsentrasi partikel PM2.5 dan PM10 mengalami perubahan setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*. Meskipun penelitian ini menggunakan empat perlakuan (P0, P1, P2, dan P3), pembahasan difokuskan pada perbandingan antara perlakuan kontrol (P0) dan perlakuan kombinasi (P3). Hal ini dilakukan karena tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi efektivitas sistem *wet scrubber* secara terintegrasi dalam kondisi operasional yang paling optimal.

Secara prinsip, sistem *wet scrubber* bekerja melalui kombinasi mekanisme penyemprotan (*spray*) yang meningkatkan luas permukaan kontak gas-cair, serta penahanan (*trap*) yang memperpanjang waktu kontak antara gas dan media cair. Oleh karena itu, konfigurasi kombinasi (P3) merepresentasikan kondisi kerja sistem yang paling mendekati aplikasi nyata di lapangan. Meskipun demikian, perlakuan tunggal (P1 dan P2) tetap dianalisis dalam penelitian ini dan menunjukkan kecenderungan penurunan konsentrasi polutan. Namun, berdasarkan hasil uji Tukey HSD, tidak terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan yang menggunakan *wet scrubber* ( $p > 0,05$ ), sehingga pembahasan difokuskan pada perbandingan antara kondisi tanpa perlakuan dan sistem kombinasi sebagai representasi kinerja terbaik teknologi yang dikaji.



Gambar 7. Konsentrasi PM2.5 and PM10 di seluruh perlakuan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan sistem *wet scrubber* mampu menurunkan konsentrasi partikel yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa. Partikel PM2.5 dan PM10 pada perlakuan kontrol menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan yang

menggunakan sistem *wet scrubber*. Setelah gas buang melewati sistem *scrubbing*, konsentrasi partikel mengalami penurunan pada setiap konfigurasi perlakuan.

Perbandingan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub> pada setiap perlakuan juga dapat diamati secara visual pada Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa perlakuan dengan sistem *wet scrubber* menghasilkan konsentrasi partikel yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa perlakuan, hal ini membuktikan bahwa teknologi *wet scrubber* efektif digunakan untuk mengurangi emisi partikel udara (Zhao and Liu, 2022).

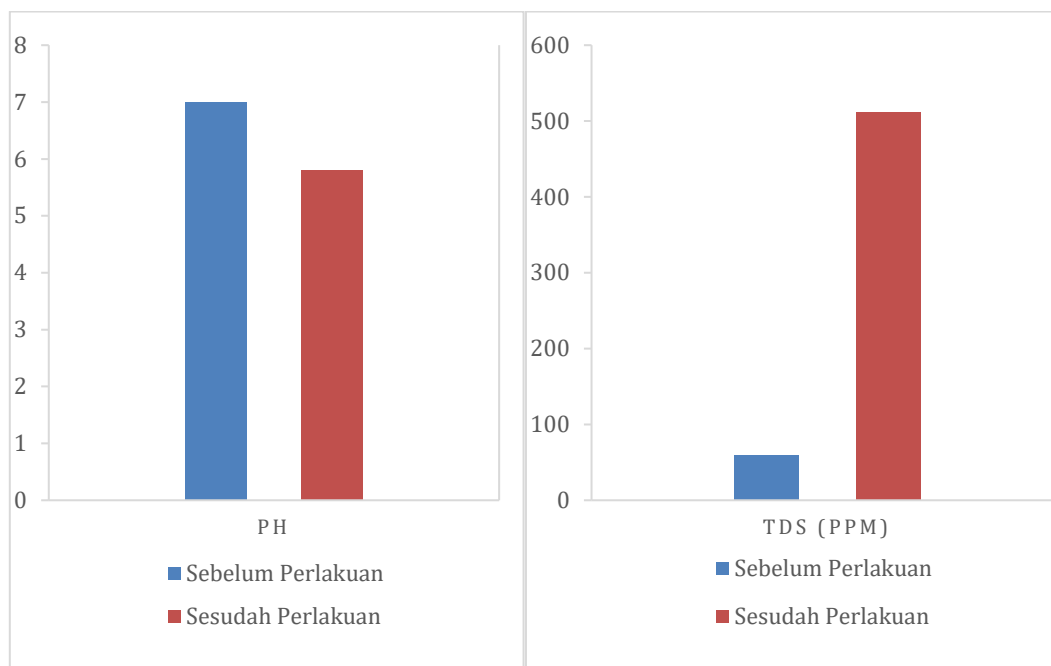
Penurunan konsentrasi *Particulate matter* terjadi karena adanya mekanisme penangkapan partikel oleh tetesan air dalam sistem *wet scrubber*. Apabila dihitung berdasarkan data tersebut, efisiensi penurunan berada pada kisaran  $\pm 16\%$  untuk PM<sub>2.5</sub> dan  $\pm 18\%$  untuk PM<sub>10</sub>, yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan hasil penelitian (Liang et al., 2022) yang melaporkan efisiensi penghilangan PM sebesar 73,8%–90,2%. Perbedaan ini disebabkan oleh variasi desain sistem, kondisi operasi, serta karakteristik partikel yang ditangani. Penelitian Liang et al. (2022) menggunakan sistem *wet scrubber* yang telah dioptimasi dengan teknologi intensifikasi, seperti penggunaan *rotating packed bed* dan penambahan surfaktan, sehingga meningkatkan luas kontak gas–cair dan efisiensi penangkapan partikel. Sementara itu, sistem yang digunakan dalam penelitian ini masih bersifat sederhana dengan konfigurasi dasar, sehingga efisiensi penangkapan partikel yang dihasilkan lebih rendah.

Pada sistem *Water sprayer*, tetesan air berfungsi menangkap partikel halus yang terbawa aliran gas melalui proses impaksi dan difusi (Pang et al., 2025). Sementara itu, pada sistem *Water trap*, aliran gas dipaksa melewati media air sehingga partikel dapat tertahan di dalam cairan. Kombinasi kedua mekanisme tersebut meningkatkan peluang penangkapan partikel sehingga konsentrasi PM yang keluar dari sistem menjadi lebih rendah (Wansom et al., 2023).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa teknologi *wet scrubber* efektif digunakan untuk mengurangi emisi partikel udara melalui mekanisme impaksi, difusi, dan absorpsi selama kontak antara gas dan cairan berlangsung (Rifai et al., 2021). Efektivitas penangkapan partikel juga dipengaruhi oleh ukuran partikel, kecepatan aliran gas, serta ukuran tetesan cairan yang dihasilkan oleh sistem *sprayer* (Hamzah et al., 2022).

### **Kualitas Air *Scrubbing* (pH dan TDS)**

Selain mengukur konsentrasi polutan gas dan partikel, penelitian ini juga menganalisis perubahan kualitas air yang digunakan sebagai media *scrubbing*. Parameter yang diamati meliputi derajat keasaman (pH) dan *total dissolved solids* (TDS). Hasil pengukuran perubahan kualitas air *scrubbing* pada setiap perlakuan disajikan pada Gambar 8. Namun, visualisasi yang ditampilkan difokuskan pada perbandingan kondisi sebelum perlakuan dan setelah perlakuan pada sistem dengan efisiensi tertinggi, yaitu kombinasi *water sprayer* dan *water trap*, sehingga dapat merepresentasikan perubahan kualitas air secara optimal.



Gambar 8. Pengaruh perlakuan terhadap kualitas air

Berdasarkan data pada Gambar 8, nilai pH air *scrubbing* mengalami perubahan setelah digunakan dalam proses penyerapan polutan gas hasil pembakaran biomassa. Perubahan nilai pH 7,0 menjadi 5,8 menunjukkan bahwa sebagian gas hasil pembakaran biomassa terlarut dalam media cair dan membentuk senyawa yang bersifat asam, fenomena ini menunjukkan bahwa terjadi interaksi antara gas buang dan media cair selama proses *scrubbing* berlangsung. Senyawa gas yang terlarut dalam air dapat mempengaruhi keseimbangan kimia dalam cairan sehingga menyebabkan perubahan tingkat keasaman (Tang et al., 2023).

Selain perubahan pH, nilai TDS juga mengalami peningkatan setelah proses *scrubbing* dilakukan. Peningkatan nilai TDS menunjukkan adanya akumulasi zat terlarut dalam air *scrubbing* yang berasal dari partikel maupun senyawa gas yang tertangkap selama proses kontak antara gas dan cairan. Hal ini mengindikasikan bahwa media air berperan sebagai penangkap polutan yang efektif dalam sistem *wet scrubber* (Wang et al., 2024b). Meskipun perlakuan lain (P1 dan P2) juga menunjukkan kecenderungan perubahan yang serupa, pembahasan difokuskan pada konfigurasi kombinasi karena memberikan kinerja penyerapan polutan yang paling tinggi.

Perubahan kualitas air *scrubbing* ini juga mendukung mekanisme penurunan konsentrasi polutan gas dan partikel yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Proses perpindahan massa dari fase gas ke fase cair menyebabkan sebagian senyawa polutan terlarut dalam air sehingga meningkatkan kandungan zat terlarut dalam media *scrubbing* (Supriyadi et al., 2021). Fenomena ini juga dilaporkan pada penelitian lain yang menunjukkan bahwa penggunaan *wet scrubber* dapat meningkatkan kandungan zat terlarut dalam air akibat proses absorpsi polutan selama operasi berlangsung (Rifai et al., 2021).

Dengan demikian, perubahan nilai pH dan TDS pada air *scrubbing* menunjukkan bahwa media cair dalam sistem *wet scrubber* tidak hanya berfungsi sebagai pendingin gas buang, tetapi juga berperan dalam proses penangkapan dan pelarutan polutan selama proses pengolahan emisi berlangsung.

## KESIMPULAN

### Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi *wet scrubber* mampu menurunkan konsentrasi polutan gas dan partikel yang dihasilkan dari proses pembakaran biomassa agroindustri. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh parameter yang diamati, yaitu HCHO, TVOC, CO, dan CO<sub>2</sub> mengalami penurunan yang signifikan setelah gas buang dialirkan melalui sistem *wet scrubber*.

Perlakuan kombinasi *Water sprayer* dan *Water trap* menunjukkan kinerja reduksi paling tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Sistem tersebut mampu menurunkan konsentrasi HCHO hingga 98,02%, TVOC sebesar 96,70%, CO sebesar 98,52%, serta CO<sub>2</sub> sebesar 87,77% dibandingkan kondisi kontrol. Selain itu, penerapan sistem *wet scrubber* juga mampu menurunkan konsentrasi *particulate matter* (PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>) serta menyebabkan perubahan kualitas air *scrubbing* yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai TDS dan perubahan pH akibat proses penyerapan polutan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi *wet scrubber* dengan konfigurasi kombinasi *water sprayer* dan *water trap* berpotensi menjadi alternatif teknologi pengendalian emisi yang efektif untuk meningkatkan kualitas udara pada sektor agroindustri yang menghasilkan emisi dari proses pembakaran biomassa.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diajukan antara lain penambahan *packing material* atau *mist eliminator* pada sistem *wet scrubber* guna meningkatkan efisiensi penangkapan *partikulat* halus, eksplorasi penggunaan aditif kimia untuk meningkatkan kemampuan penyerapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), serta pengembangan sistem *wet scrubber* bertingkat untuk meningkatkan efisiensi pengendalian emisi secara keseluruhan. Inovasi lanjutan dan penyempurnaan desain di masa depan diharapkan dapat semakin meningkatkan efektivitas sistem *wet scrubber* dan mendorong penerapannya secara lebih luas pada sektor agroindustri.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Z., Kumar, R., Kumar, A., Xu, R., Miwa, S., Okamoto, K., and Suzuki, S. 2025. Journal of Environmental Chemical Engineering Effect of wettability and particle size on aerosol removal efficiency in charged and neutral water spray systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 115822. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115822>
- Al-faliti, M., Dvorak, B., and Hassan, A. A. 2022. Removal of a mixture of formaldehyde and methanol vapors in biotrickling filters under mesophilic and thermophilic conditions : Potential application in ethanol production. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 72(6), 602–616. <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2056262>
- Baloyi, H. I., Okonye, L. U., and Ren, J. 2024. Design of retrofit flue gas ( scrubber for dependable clean energy at the Duvha Coal Power Plant. In *Scientific Reports*. Nature Publishing Group UK. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72104-9>
- Bhattacharyya, D., and Miller, D. C. 2017. Post-combustion CO<sub>2</sub> capture technologies — a review of processes for solvent-based and sorbent-based CO<sub>2</sub> capture. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.06.005>
- Bianchini, A., Pellegrini, M., Rossi, J., and Sacconi, C. 2018. Biomass and Bioenergy Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers. *Biomass and Bioenergy*,

- 116(June), 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.011>
- Borhani, T. N., Reza, M., Hosseinpour, M., Salimi, M., Afkhamipour, M., Oko, E., Kahllaghi, N. 2024. Carbon Capture Science and Technology CO<sub>2</sub> absorption-desorption cycles : Progress , gaps , and future. *Carbon Capture Science and Technology*, 13(July), 100325. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100325>
- Chen, P., Jhuang, J., and Lin, Z. 2024. Piperazine-Based Mixed Solvents for CO<sub>2</sub> Capture in Bubble-Column Scrubbers and Regeneration Heat. *Processes*.
- Chin, T., Tam, I., and Yin, C. 2023. Wet scrubbing process with oxidation and reduction in series for removal of SO<sub>2</sub> and NO from marine diesel engine exhaust. *Chemical Engineering Journal*, 464(February), 142299. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142299>
- Fadhilah, N., Le-minh, N., Hayes, J. E., and Stuetz, R. M. 2022. Performance of wet scrubbers to remove VOCs from rubber emissions. *Journal of Environmental Management*, 305(January), 114426. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114426>
- Fan, J., Wang, T., Wang, Q., Ma, D., Li, Y., Zhou, M., and Wang, T. 2023. Science of the Total Environment Assessment of HCHO in Beijing during 2009 to 2020 using satellite observation and numerical model : Spatial characteristic and impact factor. *Science of the Total Environment*, 894(June), 165060. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165060>
- Giustacori, P., and Brunazzi, E. 2025a. Analysis of Mass Transfer Efficiency in a Compact Wet Scrubber. *Chemical Engineering Transactions*, 117(April), 625–630. <https://doi.org/10.3303/CET25117105>
- Giustacori, P., and Brunazzi, E. 2025b. Characterization of a Reverse Jet Scrubber for gas / liquid absorption. *Chemical Engineering Science*, 308(July 2024), 121391. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121391>
- Gonca, S., and Dizge, N. 2022. Chemosphere An integrated process for wet scrubber wastewater treatment using electrooxidation and pressure-driven membrane filtration. *Chemosphere*, 308(September). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136216>
- Hamzah, I., Lihawa, F., and Maryati, S. 2022. Analisis Hubungan Jumlah Kendaraan Dan Konsentrasi Karbon Monoksida (CO) Di Kota Gorontalo, Provinsi Gorontalo. *Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas*, 1, 40–49.
- Hassan, A., Samy, G., Hegazy, M., Balah, A., and Fathy, S. 2024. Statistical analysis for water quality data using ANOVA ( Case study – Lake Burullus influent drains ). *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4), 102652. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102652>
- Huang, Y., Ren, J., Yuan, Y., Ma, R., Zhou, W., and Cao, Y. 2026. Quantifying supply and demand relationships of ecological products provides insights for environmental management. *Ecological Engineering*, 224(August 2025), 107864. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107864>
- Kahar, Karmini, M., and Kamaludin, A. 2022. Ekstrak lidah mertua (sansevieria sp.) Efektif dalam mereduksi volatile organic compound (voc) benzena dalam ruang. *Jurnal Dan Aplikasi Teknik Kesehatan Lingkungan*, 19(1), 1–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.31964/jkl.v19i1.342>
- Kamboj, A., Kumar, P., Yadav, B., Kumari, A., Kumar, R., Singh, B., Singh, J. 2024. Journal of Environmental Chemical Engineering Unravelling the potential of sugarcane bagasse : An eco-friendly and inexpensive agro-industrial waste for the production of valuable products using pretreatment processes for sustainable bio-economy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114461. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114461>
- Kao, L. S., Green, C. E., and Ph, D. 2008. Analysis of Variance : Is There a Difference in Means and What Does It Mean? *Journal of Surgical Research*, 170, 158–170.

<https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.02.053>

- Kwak, S. 2023. Are Only p -Values Less Than 0 . 05 Significant ? A p -Value Greater Than 0 . 05 Is Also Significant ! *Journal of Lipid and Atherosclerosis*, 12(2), 89–95.
- Lanjekar, P. R., and Panwar, N. L. 2025. Design and optimization of water scrubbing system for tar reduction in biomass gasification : a statistical. *Oxford Open Energy*, (January), 0–9.
- Liang, C., Hsu, P., Yuan, M., Chen, Y., Chang, C., Chang, C., Liang, C. 2022. Removal of fine particulate matter from cooking-oil fume using an intensified mobile chemical scrubber based on a rotating packed bed with green surfactants. *Process Safety and Environmental Protection*, 164(February), 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.054>
- Linares-hern, I., Teutli-sequeira, E. A., Lobato, J., and Rodrigo, M. A. 2023. Removal of VOCs using electro-Fenton assisted absorption process. *Journal of Enviromental Chemical Engineering*, 11(January). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110041>
- Liu, J., Zhao, D., Wu, F., Luo, H., Hou, D., and Peng, Y. 2025. Impact of Air Pollution Control Devices on VOC Profiles and Emissions from Municipal Waste Incineration Plant. *Toxics*, 1–16.
- Lu, P., Yan, X., Ye, L., and Chen, D. 2024. Performance and mechanism of CO 2 absorption during the simultaneous removal of SO 2 and NO x. *Journal of Environmental Sciences*, 135, 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.08.028>
- Mendoza-rodríguez, C. A. 2025. through the Ozone Monitoring Instrument. *Environmental Pollution and Management*, 2(August), 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2025.08.002>
- Musaid, P. P., Valsala, V., Halder, S., and Tiwari, Y. K. 2026. Science of the Total Environment Quantifying the annual atmospheric CO 2 burden from biomass burning and its transport time to monitoring sites. *Science of the Total Environment*, 1011(August 2025), 181202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181202>
- Naufaldi, D. A., Wardhany, A. K., and Putra, B. A. 2022. Sistem monitoring kadar co2 underground pit stamping shop berbasis internet of things. *Electrices*, 4(2), 73–79.
- Nursabrina, A., Joko, T., and Septiani, O. 2021. Kondisi Pengelolaan Limbah B3 Industri Di Indonesia Dan Potensi Dampaknya : Studi Literatur The Condition of Industrial Hazardous Waste Management in Indonesia and Its. *Jurnal Riset Kesehatan Poltekkes Depkes Bandung*, 13(1), 80–90.
- Office of Chemical Safety and Pollution Prevention. 2025. Revised Draft Human Health Risk Assessment for Formaldehyde CASRN 50-00-0. *U.S Environmental Protection Agency*, (December).
- Oh, G., Do, E., Kang, S., Kim, W., Yoo, S. S., and Kang, J. 2024. A Wet Scrubber and Electrooxidation System for the Efficient Removal of Odor: A Bench-Scale Study. *Sustainability*, 1–12.
- P, H. R., Chaurasia, K., and Bansal, A. 2025. Strategies at a glance : A comparative analysis of training techniques for optimizing early-exit deep neural networks. *Neural Networks*, 192(August), 107970. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2025.107970>
- Padoan, S., Mudan, A., Bendl, J., Saraji-bozorgzad, M. R., Uwe, K., Etzien, U., Adam, T. 2024. How do different marine engine fuels and wet scrubbing affect gaseous air pollutants and ozone formation potential from ship emissions? *Environmental Research*, 260(July). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119609>
- Pang, X., Ge, S., Liu, S., Liu, X., Zhang, X., Chen, X., Sha, D. 2025. Experimental and simulation research on particulate matter , NO , and SO 2 removal using dielectric barrier discharge non-thermal plasma. *Chemical Engineering Journal*, 523(August).

- Piccoli, C., Freitas, M. De, Freitas, G. De, Dalmolin, M., Checa, M., Arauzo, P. J., Kruse, A. 2026. Journal of Hazardous Materials Advances From coffee waste to wastewater treatment: Optimization of hydrothermal carbonization and  $H_3PO_4$  activation for Cr (VI) adsorption. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 21(November 2025), 100966. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100966>
- Psistaki, K., Achilleos, S., Middleton, N., and Paschalidou, A. K. 2023. Science of the Total Environment Exploring the impact of particulate matter on mortality in coastal Mediterranean environments. *Science of the Total Environment*, 865(September 2022), 161147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161147>
- Putri, N. A. H. A., Indraswari, A., Wulandari, Y., and Juni atmoko, R. 2022. Green Accounting: Analisis Penerapan Green Innovation Pada Pengelolaan Limbah Pabrik Tahu di Kartasura. *Jurnal Akuntansi Dan Audit Syariah*, 3(2), 196–214.
- Rak-mardyła, A., Gregoraszczyk, E. L., Karpeta, A., and Duda, M. 2012. Expression of ghrelin and the ghrelin receptor in different stages of porcine corpus luteum development and the inhibitory effects of ghrelin on progesterone secretion,  $3\beta$ -hydroxysteroid dehydrogenase ( $3\beta$ -HSD) activity. *Theriogenology*, 77(8), 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.11.017>
- Rifai, M. H., Rachmat, H., and Prasetyo, M. D. 2021. Pemanfaatan Internet Of Things (IoT) Untuk Rancang Bangun Uav (Unmanned Aerial Vehicle) Alat Pengukuran Polutan  $CO$  dan  $CO_2$  Di Pabrik Manufaktur Menggunakan Esp-Now Utilization Of Internet Of Things (IoT) Design Uav (Unmanned Aerial Vehicle) Co An. *E-Proceeding of Engineering*, 8(5), 7096–7106.
- Samsugi, S., and Suwanto, A. 2020. Pemanfaatan Peltier dan Heater Sebagai Alat Pengontrol Suhu Air Pada Bak Penetasan Telur Ikan Gurame. *Jurnal Informatika Dan Komputer*, 5(1), 295–299.
- Schicklin, C., Kissling, T., Weissenborn, S., Claude, P., Rauter, G., and Braissant, O. 2026. Talanta Real-time monitoring of cell culture contamination via TVOC and gas sensing technologies. *Talanta*, 300(August 2025), 128958. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128958>
- Sharif, A., Mahmood, N., Wang, S., Hussain, I., Hou, Y., Yang, L., Yang, B. 2021a. Chemosphere Recent advances in hybrid wet scrubbing techniques for  $NO_x$  and  $SO_2$  removal: State of the art and future research. *Chemosphere*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129695>
- Sharif, A., Mahmood, N., Wang, S., Hussain, I., Hou, Y., Yang, L., Yang, B. 2021b. Recent advances in hybrid wet scrubbing techniques for  $NO_x$  and  $SO_2$  removal: State of the art and future research. *Chemosphere*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129695>
- Shin, H., Lee, H., Song, J., Jae, S., Kim, J., Park, S., Min, S. 2025. Short-term  $PM_{2.5}$  exposure among 3-year cancer survivors with incident cardiovascular disease before and during the COVID-19 pandemic period. *Atmospheric Pollution Research*, 16(9), 102574. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102574>
- Si, Z., Song, X., Wang, Y., Cao, X., Zhao, Y., Ge, X., and Wang, Y. 2021. Assessment and Optimization of Formaldehyde Removal Using Tidal Flow Constructed Wetlands. *Polish Journal Environment Study*, 30(1), 987–992. <https://doi.org/10.15244/pjoes/122440>
- Sudha, S., and Mohapatra, A. K. Das. 2022. Weavers' perception towards sustainability of sambalpuri handloom: A Tukey's HSD test analysis. *Materials Today: Proceedings Journal*, 51, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.242>
- Suo, Z., Zhuang, Y., Zhao, Y., Zhou, P., Li, F., and Huang, B. 2025. Bypassing gas-liquid mass transfer resistance in a Fenton wet scrubber for boosting the removal of hydrophobic styrene: Construction of a novel gas-solid-liquid triple-phase interface. *Chemical Engineering Journal*, 506(January), 160166. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160166>

- Supriyadi, S., Androva, A., Ari, P., Prasetyo, D., Mesin, J. T., Mesin, J. T., Gasifikasi, T. 2021. Rancang Bangun Filter Wet Scrubber Untuk Penurunan Temperatur Dan Pengurangan Kandungan Tar Terhadap Hasil. *Journal of Automotive Technology Vocational Education*, 02(1), 45–55.
- Talaiekhosani, A., Salari, M., Reza, M., and Bagheri, M. 2016. Formaldehyde removal from wastewater and air by using UV , ferrate ( VI ) and UV / ferrate ( VI ). *Journal of Environmental Management*, 184, 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.084>
- Tang, Y., Bai, Y., Lin, Y., Wu, H., Hu, Y., Wang, L., Wang, X. 2023. Results in Engineering Treatment of flue gas desulfurization wastewater by a coupled precipitation-ultrafiltration process. *Results in Engineering*, 17(February), 100938. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100938>
- Tsai, C., Huang, P., Lai, H., Lin, J. C., and Hung, H. 2025. Atmospheric Environment : X Addressing underestimated carbon monoxide emissions in Taiwan using CMAQ and impacts on local ozone concentration. *Atmospheric Environment: X*, 26(April), 100325. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100325>
- Wang, L., Zhang, C., Xu, T., Lv, L., and Zhang, Z. 2024a. Treatment of VOCs with a wet scrubbing – catalytic ozonation process : Efficiency , mechanism and pilot-scale application. *Separation and Purification Technology*, 336(October 2023), 126223. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126223>
- Wang, L., Zhang, C., Xu, T., Lv, L., and Zhang, Z. 2024b. Treatment of VOCs with a wet scrubbing – catalytic ozonation process : Efficiency , mechanism and pilot-scale application. *Separation and Purification Technology*, 336(December 2023), 126223. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126223>
- Wansom, A., Maneechot, P., Jiteurtragool, N., and Vitidsant, T. 2023. PM2.5 Collection Enhancement in a Smart Hybrid Wet Scrubber Tower. *Processes*.
- Zhao, L., and 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(April), 109133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109133>
- Zhao, L., You, R., Liu, J., and Chen, Q. 2024. A real-time measurement and analysis method for gas holdup in a wet scrubber with the use of image information entropy. *Separation and Purification Technology*, 345(January), 127255. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127255>
- Ziobrowski, Z., and Rotkegel, A. 2022. Comparison of CO 2 Separation Efficiency from Flue Gases Based on Commonly Used Methods and Materials. *Materials*.