

Pengolahan Gas Buang Hasil Pembakaran Campuran Refuse Derived Fuel dan Serbuk Gergaji dengan *Spray Tower Scrubber*

Treatment of Flue Gas from the Combustion of Refuse Derived Fuel and Sawdust Using a Spray Tower Scrubber

Ilmi¹, Junjungan Simamora^{1*}, Suherman², Zufri Hasrudy Siregar³

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan 20222, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan 20238, Indonesia

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Al Azhar Medan, Sumatera Utara, Medan 20143, Indonesia

*Corresponding author: junjungansimamora92@gmail.com

Diterima: 23-03-2025

Disetujui: 22-04-2025

Dipublikasikan: 30-04-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Volume sampah yang terus meningkat mendorong pemanfaatan bahan bakar dari limbah sebagai alternatif energi. Namun, proses pembakaran bahan ini menghasilkan gas buang yang mengandung polutan berbahaya. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas menara semprot dalam mengurangi opasitas dan suhu gas buang hasil pembakaran campuran bahan bakar limbah dan serbuk gergaji. Pengujian dilakukan dengan tiga massa bahan bakar dan tiga kondisi alat, yaitu tanpa penyemprot, dua penyemprot, dan empat penyemprot. Hasil menunjukkan bahwa menara semprot mampu menurunkan opasitas dari 33 persen menjadi sekitar 15 persen dengan dua penyemprot dan 11,2 persen dengan empat penyemprot. Suhu gas buang juga turun dari 65 derajat Celsius menjadi 39 derajat Celsius dan 35 derajat Celsius. Semakin banyak jumlah penyemprot, semakin efektif pengurangan polutan. Teknologi ini berpotensi diterapkan sebagai solusi pengendalian emisi yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: gas buang, *refuse derived fuel*, serbuk gergaji, menara semprot, opasitas, suhu.

Abstract

The growing volume of waste has encouraged the use of fuel derived from waste as an alternative energy source. However, its combustion releases flue gas containing harmful pollutants. This study assesses the effectiveness of a spray tower in reducing the opacity and temperature of flue gas generated from the combustion of a mixture of waste-based fuel and sawdust. Experiments used three fuel masses and three system setups: no sprayer, two sprayers, and four sprayers. Results showed that the spray tower reduced opacity from 33 per cent to about 15 per cent with two sprayers and 11.2 per cent with four sprayers. Gas temperature decreased from 65 degrees Celsius to 39 degrees and 35 degrees Celsius. A higher number of sprayers led to greater pollutant reduction. This technology shows promise as an environmentally friendly method for controlling emissions.

Keywords: flue gas, *refuse derived fuel*, sawdust, spray tower, opacity, temperature.

1. Pendahuluan

Sekitar 80% dari konsumsi energi dunia global berasal dari bahan bakar fosil dan ini berdampak negatif pada manusia dan lingkungan sekitar mereka karena meningkatnya emisi CO₂, NO_x dan SO₂ (Wiyono.dkk, 2021). Dibandingkan dengan bahan bakar tradisional, bahan

bakar yang berasal dari sampah dicirikan oleh heterogenitas yang tinggi, densitas massal yang rendah, dan kandungan air, abu, dan klorin yang tinggi (Dorokhov.dkk. 2024).

Di lingkungan perkotaan, tumpukan sampah padat, yang umumnya disebut sebagai sampah kota (MSW), merupakan produk sampingan langsung dari gaya hidup perkotaan. Komposisi rata-rata MSW di seluruh dunia terdiri dari sekitar 44% sampah makanan dan hijau, 38% bahan daur ulang kering termasuk plastik, kertas dan kardus, logam dan kaca, 2% karet dan kulit, 2% kayu, dan 14% bahan lainnya (Fazil dkk.2023).

Biomassa merupakan sumber energi yang penting di banyak negara. Ada sejumlah besar residu biomassa yang tersedia, yang terkait dengan produksi pertanian dan industri pengolahan kehutanan (Dorokhov.dkk. 2024). Serbuk gergaji merupakan salah satu sumber daya biomassa penting, yang mudah diperoleh di banyak negara dan wilayah dengan industri kehutanan. Ini terutama berasal dari tempat penggergajian kayu. Serbuk gergaji umumnya memiliki kandungan sulfur yang sangat rendah, sehingga pembentukan emisi SO_2 tidak menjadi masalah (Fazil dkk.2023). Pembakaran serbuk gergaji tampaknya menjadi sumber energi biomassa yang menjanjikan, yang memiliki emisi polutan yang lebih rendah dan dapat berkontribusi pada konservasi energi karena menjadi pengganti bahan bakar fosil yang layak. Hanya di bawah 20% dari sampah padat kota (MSW) yang didaur ulang, sisanya dikubur dan dibuang (Dorokhov.dkk. 2024). Masalah timbulan sampah terus menjadi tantangan besar bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Salah satu pendekatan untuk mengurangi volume sampah adalah dengan proses termal melalui pembakaran, atau yang dikenal dengan insinerasi. Metode ini mampu mengurangi secara signifikan jumlah limbah padat yang harus ditangani di tempat pembuangan akhir (Sumarsono, 2019).

Insinerasi atau pembakaran termal dilakukan dalam tungku bakar yang beroperasi pada suhu tinggi, antara 600 °C hingga 1100 °C, dan menghasilkan residu padat yang lebih ramah lingkungan. Namun, proses ini juga memunculkan tantangan baru berupa emisi gas buang yang mengandung zat berbahaya seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), dan senyawa organik volatil. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengendalian pencemaran udara untuk memastikan emisi yang dilepaskan tidak melampaui ambang batas yang ditetapkan (Said & Hernawati et al., 2017).

Salah satu teknologi pengendalian emisi yang banyak diterapkan adalah *wet scrubber*, terutama tipe *spray tower scrubber*. Alat ini bekerja dengan menyemprotkan larutan penyerap dalam bentuk butiran halus ke dalam aliran gas buang, sehingga partikel dan gas asam dapat diserap secara efisien (Crittenden et al., 2012). *Wet scrubber* memiliki beberapa varian seperti *spray tower*, *cyclonic spray tower*, *venturi scrubbers*, dan lainnya, yang digunakan sesuai kebutuhan dan karakteristik emisi. Teknologi ini juga bertujuan agar emisi gas buang memenuhi standar baku mutu yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 70 Tahun 2016 (Bhargava, 2016).

Dalam konteks efisiensi energi dan keberlanjutan, penggunaan *Refuse Derived Fuel* (RDF) sebagai bahan bakar alternatif kini semakin relevan. RDF merupakan bahan bakar padat yang berasal dari limbah non-organik yang telah diproses dan dikeringkan, dan dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam proses pembakaran. Namun, pembakaran RDF juga menghasilkan *flue gas* yang mengandung berbagai polutan yang berisiko terhadap kesehatan dan lingkungan jika tidak ditangani secara tepat (Yin et al., 2019).

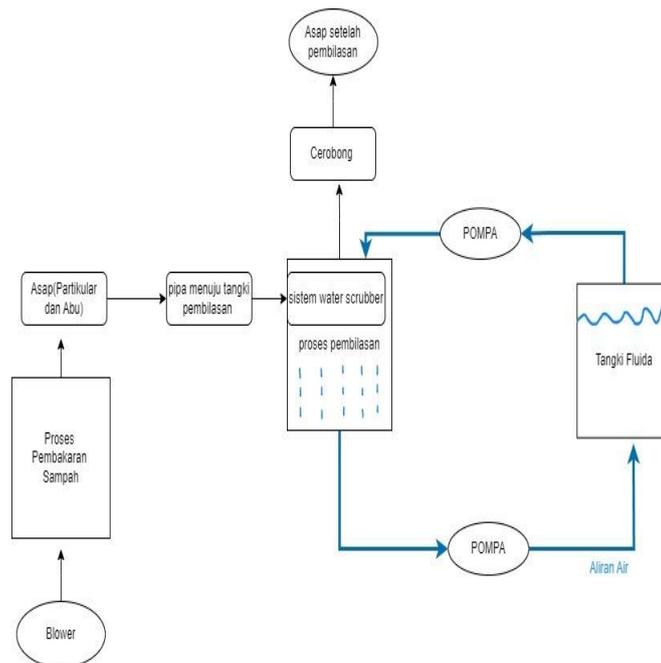
Beberapa peneliti telah mengevaluasi kinerja *wet scrubber* untuk menurunkan emisi partikulat hasil pembakaran pada boiler pada berbagai industri. Rahmawati dkk (2020) mengevaluasi kinerja *cyclone* dan *wet scrubber* pada unit paper mill. Kinerja *cyclone* dan *wet scrubber Boiler* Hitachi dan Hamada II masing-masing sebesar 94% dan 96%. Lebih

lanjut, opasitas dan Partikulat, SO₂, NO₂ pada industri baja dikendalikan dengan *wet scrubber* dan *bag filter*. Firdaus dkk. 2023 menyebutkan kecepatan alir sebesar 8,92 m/s dan efisiensi kinerja *wet scrubber* dan *bag filter* masing-masing 75% dan 67%. Disisi lain, *wet scrubber* pada pabrik kelapa sawit dirancang untuk mendapatkan efisiensi dalam menurunkan emisi partikulat sebesar 90% (Noverianto, 2015). Untuk mendukung efisiensi pembakaran RDF dan meningkatkan nilai kalor campuran bahan bakar, digunakan tambahan serbuk gergaji (sawdust) sebagai ko-fuel. Sawdust memiliki karakteristik yang mudah terbakar dan ketersediaan yang melimpah, sehingga menjadi pilihan yang efisien dalam proses insinerasi (Rahman et al., 2020). Asap yang dihasilkan dari pembakaran RDF dan sawdust mengandung berbagai zat berbahaya yang memerlukan pengolahan sebelum dilepaskan ke lingkungan. Oleh karena itu, penggabungan teknologi insinerasi dengan sistem pengendalian emisi seperti *wet scrubber* menjadi solusi penting dalam sistem pengolahan limbah padat.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas teknologi *spray tower scrubber* dalam mengolah emisi gas buang dari pembakaran RDF yang dicampur dengan serbuk gergaji, sehingga dapat menghasilkan emisi yang memenuhi standar baku mutu dan lebih ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan sistem pengolahan sampah secara termal yang lebih aman dan efisien.

2. Metode

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem pengolahan gas buang hasil pembakaran RDF yang dicampur dengan serbuk gergaji (*sawdust*) menggunakan teknologi *spray tower wet scrubber*. Uji dilakukan dengan memvariasikan jumlah *sprinkler* pada *scrubber*, yaitu dua dan empat unit. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah kadar opasitas dan suhu gas buang yang keluar dari sistem. Adapun skematik set-up alat teknologi *spray tower wet scrubber* sebagaimana disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik set up proses pengukuran opasitas dan temperatur pada tungku bakar

2.1 Desain eksperimen

Proses pembakaran dilakukan dalam tungku bakar tertutup, dengan bahan bakar berupa campuran RDF dan serbuk gergaji. Gas buang yang dihasilkan diarahkan ke sistem *wet*

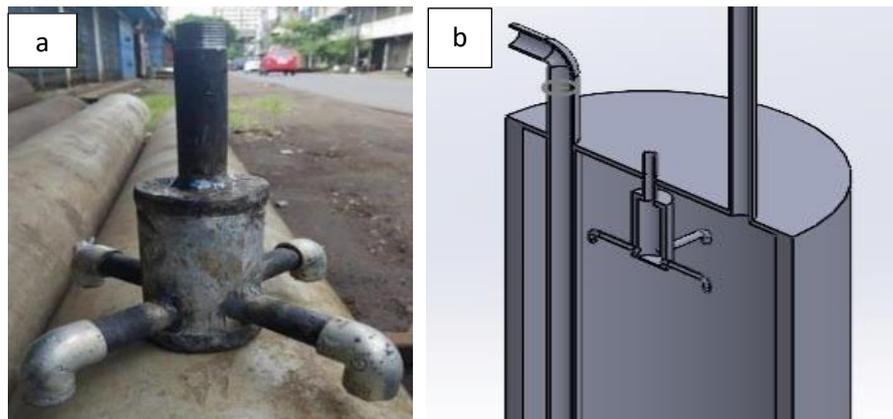
scrubber untuk dilakukan pengolahan. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jumlah sprinkler (2 dan 4 buah), sedangkan variabel terikatnya adalah opasitas asap dan suhu gas buang yang diukur setelah proses penyaringan.

2.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini menggunakan alat dan bahan sebagai berikut:

a. *Wet scrubber*

Wet scrubber berfungsi untuk menangkap partikel halus dari gas buang dengan memanfaatkan media cair (Gambar 2). Dalam sistem ini, partikel padat berukuran kecil dapat ditangkap oleh butiran cairan yang lebih besar. Ukuran partikel yang dibuang bergantung pada sumbernya, seperti reaksi kimia atau proses pembakaran, yang dapat menghasilkan partikel berukuran kurang dari 5 mikrometer hingga submikrometer.



Gambar 2. a) *Wet scrubber* dan b) Gambar potongan *wet scrubber*

b. *Refuse derived fuel* (RDF)

RDF merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari pengolahan limbah padat, yang telah melalui proses pemilahan dan pengeringan untuk meningkatkan nilai kalorinya. RDF digunakan secara luas sebagai bahan bakar alternatif, terutama dalam aplikasi seperti pembangkit listrik dan insinerator (Gambar 3).



Gambar 3. RDF

c. *Sawdust* (Serbuk Gergaji)

Serbuk gergaji adalah limbah hasil proses pemotongan atau penghalusan kayu, berbentuk partikel halus. Umumnya berasal dari kegiatan industri pengolahan kayu seperti

penggergajian dan pembuatan furnitur (Gambar 4). Kandungan utamanya meliputi selulosa, lignin, dan hemiselulosa, sehingga menjadikannya sebagai bahan bakar alternatif yang potensial (Prasetyo et al., 2022; Rahayu & Setiawan, 2021).



Gambar 4. Serbuk gergaji

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Jenis aliran air dan *flue gas*

Untuk menentukan kecepatan aliran air di dalam pipa digunakan Persamaan 1.

$$v = \frac{Q}{A} \tag{1}$$

Dengan:

- Debit air per Sprinkler, $Q = 12 \text{ L/min} = 0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$
- Diameter pipa air, $d = \frac{3}{4} \text{ inchi} = 0,01905 \text{ m}$
- Luas Penampang, $A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0,01905)^2}{4} = 2,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Kecepatan air dalam pipa, $v = \frac{0,0002}{2,85 \times 10^{-4}} = 1,64 \text{ m/s}$

Bilangan Reynolds untuk Air

Untuk menentukan bilangan Reynolds untuk air digunakan Persamaan 2.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{2}$$

Dengan :

- Massa jenis air, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis air, $\mu = 0,001 \text{ Pa.s}$
- Kecepatan air, $v = 1,64 \text{ m/s}$
- Diameter pipa air, $d = 0,01905 \text{ m}$

Maka :

$$Re = \frac{(1000)(1,64)(0,019,5)}{0,0001} = 31.213$$

Karena $Re > 4000$, maka aliran turbulen

3.2. Debit Air

Luas penampang pipa dihitung menggunakan rumus luas lingkaran:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \tag{3}$$

Diketahui bahwa diameter pipa air adalah $\frac{3}{4}$ inchi atau 0,01905 m (konversi: 1 inchi = 0,0254 m). Maka luas penampang pipa, $A = 0,0002854 \text{ m}^2$.

Tabel 1. Pengaruh jumlah srpinkel terhadap debit air

Jumlah Sprinkler	Debit per Sprinkler (L/min)	Kecepatan Aliran (m/s)
2 Sprinkler	14	1,64
4 Sprinkler	7	1,64

3.3. Pengaruh *wet scrubber* terhadap opasitas gas buang

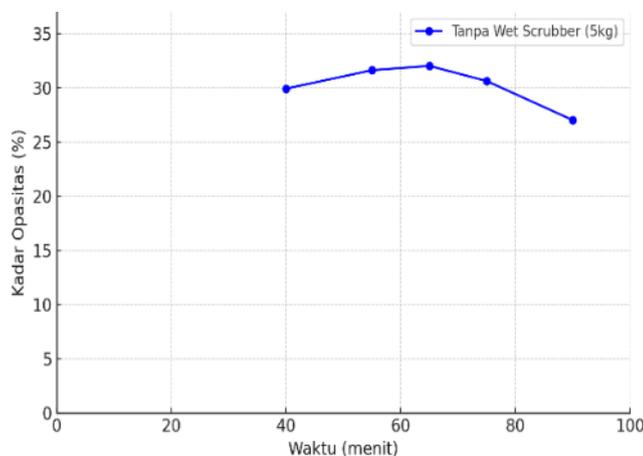
Pada penelitian ini menggunakan massa bahan bakar 5kg dengan lama waktu pembakaran yaitu sekitar 105 menit. Dimana 20 menit awal yaitu masih melakukan pemanasan awal di dalam burner sebelum di teruskan ke dalam ruang bakar. Setelah itu, dilakukan pemasukan bahan bakar secara perlahan menggunakan *conveyor (continiue)* dimana terjadi pembakaran yang stabil mulai dari menit 40, sehingga peneliti melakukan penelitian mulai dari menit 40 hingga waktu di mana bahan bakar mulai habis yaitu pada menit 90. Berikut ini adalah hasil pengujian yang dilakukan dengan massa bahan bakar 5kg dengan tanpa menggunakan *wet scrubber*, penggunaan *wet scrubber* dengan 2 *sprinkler* dan penggunaan *wet scrubber* 4 *sprinkler*.

a) Tanpa menggunakan *wet srubber*

Gambar opositas dan hasil pengujian yang telah dilakukan untuk melihat pengaruh tanpa *wet srubber* terhadap kadar opasitas pada gas buang sisa hasil pembakaran dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Opositas tanpa menggunakan *wet scrubber*



Gambar 6. Grafik tanpa menggunakan *wet scrubber*

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara waktu (menit) dan kadar opasitas (%) pada proses tanpa penggunaan *wet scrubber* dengan beban 5 kg. Dari grafik terlihat bahwa

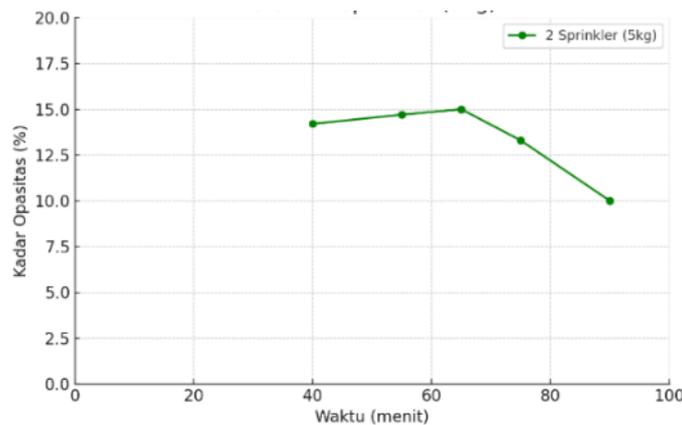
kadar opasitas meningkat sejak menit ke-40 hingga mencapai puncaknya di sekitar menit ke-60–70 dengan kadar opasitas mendekati 33%. Setelah itu, terjadi penurunan kadar opasitas hingga berada di bawah 30% pada menit ke-90. Pola ini menunjukkan bahwa tanpa sistem *wet scrubber*, kadar opasitas cenderung meningkat di awal proses, namun mulai menurun setelah melewati waktu tertentu, kemungkinan akibat menurunnya intensitas penguapan atau proses pembakaran yang tidak lagi optimal.

b) Penggunaan *wet scrubber* dengan 2 sprinkler

Ilustrasi tingkat opasitas serta hasil pengujian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketiadaan *wet scrubber* terhadap kadar opasitas gas buang hasil pembakaran ditampilkan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 7. Opasitas menggunakan *wet scrubber* dengan 2 sprinkler



Gambar 8. Grafik penggunaan *wet scrubber* dengan 2 sprinkler

Gambar 8 menunjukkan grafik hubungan antara waktu (menit) dan kadar opasitas (%) pada proses pembakaran dengan menggunakan 2 sprinkler dan beban 5 kg. Terlihat bahwa kadar opasitas awalnya meningkat secara perlahan dari sekitar 14% pada menit ke-40 hingga mencapai puncak sekitar 15% pada menit ke-65. Setelah itu, kadar opasitas mulai menurun secara bertahap hingga mencapai nilai terendah sekitar 10% pada menit ke-90. Pola ini menunjukkan bahwa penggunaan 2 sprinkler efektif dalam menekan kadar opasitas, terutama setelah melewati puncak pembentukan partikel opasit pada pertengahan proses.

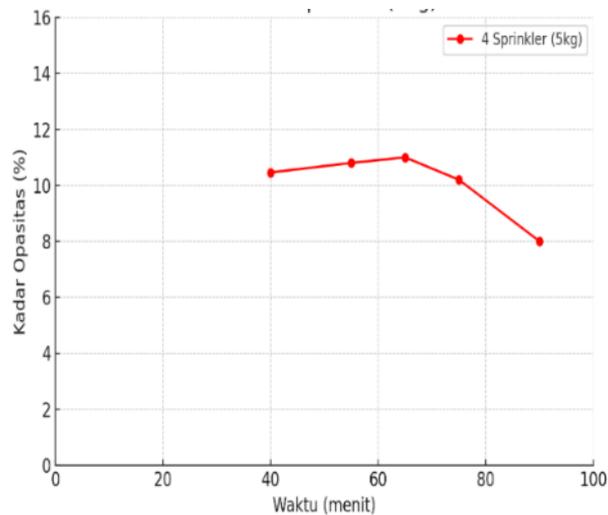
c) Penggunaan *wet scrubber* dengan 4 sprinkler

Gambar 9 dan 10 menyajikan tingkat opasitas serta hasil uji yang dilakukan untuk mengevaluasi dampak tidak digunakannya *wet scrubber* terhadap opasitas gas buang dari proses pembakaran.



Gambar 9. Opasitas menggunakan *wet scrubber* dengan 4 *sprinkler*

Gambar 10 menunjukkan grafik kadar opasitas (%) terhadap waktu (menit) pada proses pembakaran dengan penggunaan 4 *sprinkler* dan beban 5 kg. Terlihat bahwa kadar opasitas berada pada kisaran rendah, dimulai sekitar 10,5% pada menit ke-40 dan sedikit meningkat hingga mencapai puncak sekitar 11,2% pada menit ke-65. Setelah itu, kadar opasitas mengalami penurunan signifikan, turun menjadi sekitar 8% pada menit ke-90. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan 4 *sprinkler* lebih efektif dalam menekan pembentukan opasitas dibandingkan tanpa *sprinkler* atau hanya 2 *sprinkler*, dengan tren penurunan yang konsisten pada fase akhir proses pembakaran.



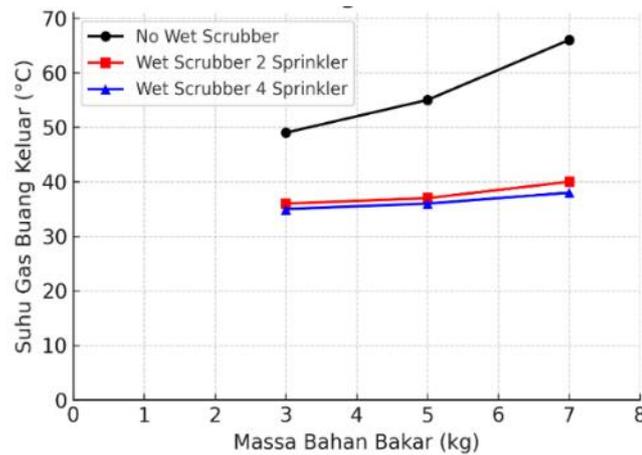
Gambar 10. Grafik penggunaan *wet scrubber* dengan 4 *sprinkler*

3.4. Pengaruh *wet scrubber* terhadap suhu gas buang

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa keberadaan *wet scrubber* memberikan pengaruh terhadap suhu gas buang sisa hasil pembakaran. Pengaruh tersebut dapat diamati melalui grafik yang ditampilkan pada Gambar 11. Grafik tersebut menunjukkan perbedaan suhu antara gas buang yang melewati *wet scrubber* dan yang tidak, yang mengindikasikan peran alat ini dalam menurunkan temperatur emisi sebelum dilepaskan ke udara.

Gambar 11 menunjukkan pengaruh massa bahan bakar terhadap suhu gas buang keluar pada tiga kondisi: tanpa *wet scrubber*, dengan *wet scrubber* 2 *sprinkler*, dan dengan *wet scrubber* 4 *sprinkler*. Terlihat bahwa suhu gas buang tertinggi terjadi pada kondisi tanpa *wet scrubber*, dengan tren kenaikan suhu yang signifikan dari sekitar 49 °C pada massa 3 kg hingga 65 °C pada massa 7 kg. Sebaliknya, penggunaan *wet scrubber* baik 2 maupun 4 *sprinkler* menunjukkan hasil yang lebih stabil dan jauh lebih rendah, dengan suhu berkisar antara 35–

39 °C. Penambahan jumlah sprinkler dari 2 menjadi 4 tidak menunjukkan perbedaan signifikan, namun tetap lebih efektif dibandingkan tanpa penggunaan *wet scrubber* dalam menurunkan suhu gas buang. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan sistem *wet scrubber* mampu mereduksi suhu gas buang secara signifikan pada proses pembakaran.



Gambar 11. Grafik suhu gas buang versus massa bahan bakar

Keberhasilan sistem ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah sprinkler dalam *wet scrubber* dapat menjadi strategi yang efektif dalam mengurangi pencemaran udara akibat pembakaran RDF dan serbuk gergaji. Dengan semakin sedikitnya partikel polutan yang terlepas ke udara, teknologi ini dapat diterapkan sebagai salah satu solusi untuk meningkatkan kualitas udara dan memenuhi standar emisi yang lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan *wet scrubber* dengan jumlah sprinkler yang optimal sangat penting dalam proses pengolahan gas buang agar lebih ramah lingkungan.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *spray tower scrubber* efektif dalam mengolah gas buang hasil pembakaran Refuse Derived Fuel (RDF) yang dicampur dengan *sawdust*. Beberapa poin penting yang dapat disimpulkan adalah:

1. Sistem *wet scrubber* secara signifikan menurunkan kadar opasitas gas buang. Tanpa scrubber, kadar opasitas mencapai puncak hingga 33%, sedangkan penggunaan 2 dan 4 sprinkler mampu menurunkannya menjadi sekitar 10% dan 8% secara berturut-turut.
2. Penggunaan *wet scrubber* juga efektif dalam menurunkan suhu gas buang. Suhu maksimum tanpa scrubber mencapai 65°C pada massa bahan bakar 7 kg, sementara dengan scrubber (2 dan 4 sprinkler), suhu dapat ditekan hingga kisaran 35–39°C.
3. Penambahan jumlah sprinkler meningkatkan efisiensi pengendalian emisi, baik dalam hal opasitas maupun suhu gas buang. Sistem dengan 4 sprinkler memberikan hasil terbaik, meskipun perbedaan dengan 2 sprinkler dalam hal suhu tidak terlalu signifikan.
4. Secara keseluruhan, *spray tower scrubber* terbukti mampu menghasilkan emisi yang lebih bersih dan stabil, sehingga dapat membantu proses pembakaran RDF menjadi lebih ramah lingkungan dan sesuai dengan standar emisi.

4.2. Saran

1. Penggunaan *wet scrubber* dengan jumlah sprinkler yang lebih banyak (minimal 4) direkomendasikan untuk sistem pembakaran RDF dan *sawdust* guna meningkatkan efisiensi penurunan emisi partikel dan suhu.

2. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian dapat difokuskan pada optimasi desain dan distribusi air pada sistem sprinkler agar efisiensi penyerapan partikel dan pendinginan dapat lebih ditingkatkan.
3. Diperlukan studi lanjutan mengenai efisiensi sistem terhadap berbagai jenis bahan bakar RDF dan komposisi campuran, guna memastikan fleksibilitas dan penerapan luas dari teknologi ini dalam pengolahan sampah secara termal.
4. Disarankan adanya integrasi sistem monitoring real-time terhadap kadar emisi dan suhu untuk memudahkan kontrol proses dan memastikan emisi selalu berada dalam batas baku mutu lingkungan.

Daftar Pustaka

- Abdullah, I., Y. N. Manik, B. Barita, J. Jufrizal, S. Supriatno, dan E. Eswanto. 2019. "Desain Insinerator Menggunakan Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit." *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi* 2(1): 34–43.
- Abdullah, Ilmi, Bagus Giri Yudanto, Arjanggih Nasution, dan Rendi Andiko. 2022. "Analisa Performansi Bahan Bakar Biogas dan Bensin terhadap Kualitas Pembakaran pada Engine Genset 4 Tak 1 Silinder Kapasitas 80 Cc." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 1(1): 66–74. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i1.9>.
- Abnisa, Faisal, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Mohd Kamaruzzaman Sopian, dan Mohammad Azizan Abu Bakar. 2013. "Characterization of Bio-Oil and Bio-Char from Pyrolysis of Palm Oil Wastes." *BioEnergy Research* 6: 830–840.
- Akhirullah, A., U. N. Harahap, dan M. Fazri. 2023. "Rancangan Perbaikan Kualitas Toko Sepatu West Store Medan Berdasarkan Pendekatan Servqual dan QFD." *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 2(2): 69–80. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v2i2.63>.
- Alwan, Hafid. 2019. "Model Gasifikasi Biomassa Menggunakan Pendekatan Kesetimbangan Termodinamika Stokiometris dalam Memprediksi Gas Produser." *Jurnal Integrasi Proses* 8(1): 31–38.
- Ashworth, Danielle C., James W. Gibbons, Irene L. Cherrie, dan David W. S. Williams. 2016. "Comparative Assessment of Particulate Air Pollution Exposure from Municipal Solid Waste Incinerator Emissions." Dalam *Air Quality*, 87–116. Oakville, Canada: Apple Academic Press.
- Bhargava, Akshey, dan A. Bhargava. 2016. "Wet Scrubber—Design of Spray Tower to Control Air Pollutants." *International Journal of Environmental Planning and Development* 2. www.journalspub.com.
- Chaerul, Mochammad, dan Yahdini Qornin Mardiyah. 2019. "Anaerobic Digestion untuk Pengolahan Sampah Organik: Analisis Multikriteria Menggunakan Metode Analytic Network Process." *Jurnal Serambi Engineering* 4(2).
- Dorokhov, G., D. Nyashina, D. Shvedov, dan P. Strizhak. 2024. "Physical Characteristics and Combustion Behavior of Pellets from Sawdust and Refuse-Derived Fuel." *Fuel* 377: 132810.
- Fazil, S. Kumar, dan S. M. Mahajani. 2023. "Gasification and Co-gasification of Paper-Rich, High-Ash Refuse-Derived Fuel in Downdraft Gasifier." *Energy* 263: 125659.
- Fitriana, Anita. 2020. *Studi Kinerja Insinerator Pengolah Limbah Cair B3 di Industri Kimia*. Disertasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Firdaus, N. A., B. M. Wulandari, dan R. Novembrianto. 2023. "Analisa Efisiensi Unit Bag Filter dan Wet Scrubber terhadap Parameter Partikulat, SO₂, NO₂, dan Opasitas pada Industri Besi dan Baja di Surabaya." *Environmental Engineering Journal ITATS* 3(1): 57–64.

- Hermansyah, Hermansyah, dan Hernawati Hernawati. 2017. "Rancang Bangun Insinerator Dua Tahap (Solusi Mengatasi Polusi Udara pada Pembakaran Sampah)." *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya* 4(1): 38–48.
- Kanhar, Altaf Hussain, Shaoqing Chen, dan Fei Wang. 2020. "Incineration Fly Ash and Its Treatment to Possible Utilization: A Review." *Energies* 13(24): 6681.
- Marosin, Riyanto. 2004. "Karakteristik Emisi Gas Buang Insinerator Medis di Rumah Sakit Jiwa Dadi Makassar Sulawesi Selatan." *Jurnal Teknologi Lingkungan BPPT* 5(1): 143303.
- Naryono, Eko, Budi Hartono, Yuniarto, dan Sudibyo. 2015. "Simulasi dan Evaluasi Insinerasi Sampah Organik Rumah Tangga pada Reaktor Unggun Tetap (Fixed Bed)." *The Indonesian Green Technology Journal* 4(2): 28–35.
- Noverianto, M. A. 2015. *Desain Wet Scrubber untuk Pengendalian Partikulat pada Industri Pengolahan Kelapa Sawit*. Skripsi, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Praseyadi. 2018. "Teknologi Penanganan Emisi Gas dari Insinerator Sampah Kota." *Teknologi Sistem Informasi dan Komputer* 11(2): 85–93.
- Raju, Muhammad, Armansyah Halomoan Tambunan, dan Radite Praeko Agus Setiawan. 2016. "Karakterisasi Arang dan Gas-Gas Hasil Pirolisis Limbah Kelapa Sawit." *Jurnal Keteknik Pertanian* 4(2).
- Rahmawati, F., B. P. Samadikun, dan M. Hadiwidodo. 2020. "Evaluasi Efisiensi Kinerja Alat Pengendali Partikulat Cyclone dan Wet Scrubber Unit Paper Mill 7/8 PT. Pura Nusapersada Kudus." *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan* 17(2): 144–153.
- Rizal, Adi Moh, dan Indah Nurhayati. 2017. "Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) dengan Insinerator Tipe Reciprocating Grate Incinerator." *Waktu: Jurnal Teknik Unipa* 15(2): 21–27.
- Said, Hernawati M. L. 2017. "Rancang Bangun Insinerator Dua Tahap (Solusi Mengatasi Polusi Udara pada Pembakaran Sampah)." *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya* 4(1).
- Sahwan, Firman L. 2012. "Analisis Proses Komposting pada Pengelolaan Sampah Berbasis Masyarakat Skala Kawasan (Studi Kasus di Kota Depok)." *Jurnal Teknologi Lingkungan* 13(3): 253–260.
- Sari, Novi Purnama, Dewi Lestari, M. Ridwan, dan Dede Mulyadi. 2024. "Perencanaan Pengembangan Kemasan Detergen Bubuk Menggunakan Metode Kansei Engineering." Dalam *Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, Vol. 3.
- Simamora, Junjungan. 2025. *Pengolahan Flue Gas dari Pembakaran Residue Derived Fuel (RDF) Dicampur dengan Sawdust: Menggunakan Spray Tower Scrubber*. Disertasi, Universitas Sumatera Utara.
- Sukrorini, Tri, Siti Aminah, dan Sri Wahyuningsih. 2014. "Kajian Dampak Timbunan Sampah terhadap Lingkungan di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Putri Cempo Surakarta." *Jurnal Ekosains* 6(3).
- Wasilah, Andi Hildayanti, dan Muhammad Zaldi Suradin. 2017. "Inovasi Gedung Pengolahan Sampah Berbasis Insinerasi yang Ramah Lingkungan." *Prosiding Temu Ilmiah IPLBI* 500: 085.
- Wiyono, A., dkk. 2021. "Enhancement of Syngas Production via Co-gasification and Renewable Densified Fuels (RDF) in an Open-Top Downdraft Gasifier: Case Study of Indonesian Waste." *Case Studies in Thermal Engineering* 27: 101205.
- Yuliani, Manis. 2016. "Insinerasi untuk Pengolahan Sampah Kota." *Jurnal Rekayasa Lingkungan* 9(2): 89–96.