

HYBRID PURIFIER GAS PEMBAKAR SAMPAH DENGAN METODE WET SCRUBBER DAN GLIDING ARC PLASMA

Raditya Fajar Nursyahid ¹⁾ ✉, Bambang Sugiantoro ²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT Wiworotomo Purwokerto
Jalan Semangkir No.1, Kabupaten
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA –
53134
raditvajar2017@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT Wiworotomo Purwokerto
Jalan Semangkir No.1, Kabupaten
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA –
53134
blotech.machining@gmail.com

Abstract

*This study aims to analyze the performance of a Hybrid Purifier system combining Wet Scrubber and Gliding Arc Plasma technologies for the purification of waste incineration gas emissions. The system is designed to reduce the concentration of major pollutants, including HCHO, VOC, and CO₂, in flue gas emissions. The research employs a **quantitative experimental method** through **laboratory testing** to measure the efficiency of emission reduction in the Wet Scrubber, Gliding Arc Plasma, and Hybrid Purifier systems. An experimental approach was applied to measure pollutant concentrations before and after purification using each individual method and the combined system. The results showed that the Wet Scrubber achieved low pollutant removal efficiency, the Plasma system significantly improved efficiency, while the Hybrid Purifier provided the best performance with removal efficiencies of 89% for HCHO, 88% for VOC, and 26% for CO₂ in organic waste combustion. These findings demonstrate that the Hybrid Purifier system can significantly improve air quality and meet emission quality standards.*

Keywords: Hybrid Purifier, Wet Scrubber, Gliding Arc Plasma

1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara akibat emisi pembakaran sampah masih menjadi masalah serius, terutama di kawasan padat penduduk dan industri. Proses ini menghasilkan berbagai polutan berbahaya seperti CO₂, VOC, HCHO, serta partikel halus (PM dan PM_{0.1}) yang sering melebihi ambang batas udara ambien. Variasi komposisi sampah juga membuat karakter emisi semakin kompleks dan sulit dikendalikan hanya dengan satu metode.

Metode Wet Scrubber umum digunakan untuk menangkap partikel dan gas terlarut, namun efektivitasnya masih rendah terhadap senyawa organik. Karena itu, dibutuhkan kombinasi dengan teknologi Gliding Arc Plasma (GAP) yang termasuk *non-thermal plasma* (NTP), mampu memecah molekul polutan tanpa suhu tinggi secara efisien dan ramah lingkungan.

Penelitian Agata (2024) menunjukkan bahwa reaktor plasma non-termal tipe *gliding arc* efektif menurunkan konsentrasi partikel sisa pembakaran diesel (250–580 nm), dengan efisiensi tertinggi pada laju aliran udara rendah (14 L/menit). Sementara itu, Dararat (2021) membuktikan bahwa teknologi NTP mampu secara signifikan mengurangi emisi NO_x dan jelaga dari pembakaran bahan bakar fosil, meskipun memerlukan pengaturan kondisi operasi yang optimal.

Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem Hybrid Purifier yang menggabungkan Wet Scrubber dan Gliding Arc Plasma untuk meningkatkan efisiensi pemurnian gas hasil pembakaran sampah, guna menurunkan kadar HCHO, VOC, dan CO₂ secara lebih efektif dan ramah lingkungan.

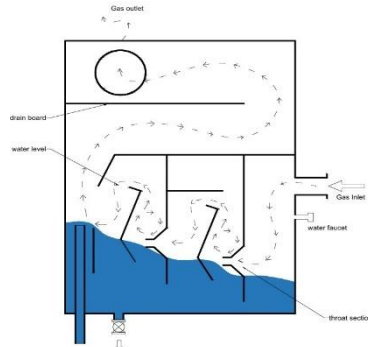
2. METODE DAN BAHAN

2.1 Metode penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental. Penelitian dilakukan secara sistematis, terstruktur, dan terperinci untuk menguji kinerja sistem Hybrid Purifier yang menggabungkan teknologi *Wet scrubber* dan *Gliding arc Plasma* (GAP) dalam proses pemurnian gas buang hasil pembakaran sampah.

Dalam pelaksanaannya, penelitian ini fokus pada pengumpulan dan analisis data kuantitatif berupa perubahan konsentrasi polutan gas seperti CO₂, HCHO, dan VOC, baik sebelum maupun sesudah proses pemurnian. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk angka, grafik, tabel, dan diagram untuk menunjukkan efektivitas masing-masing tahapan (*Wet scrubber* dan GAP), serta kinerja gabungan sistem hybrid secara keseluruhan dalam menurunkan tingkat polusi udara dari hasil pembakaran.

1. . Wett Scrubber



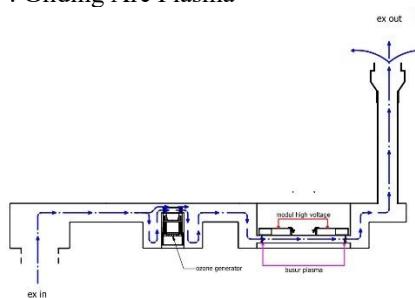
Gambar 1 Desain Alat Wett Scrubber



Gambar 2. Alat Wett Scrubber

Fungsi alat *Wet scrubber* adalah alat yang digunakan untuk membersihkan gas buang dari berbagai zat pencemar dengan memanfaatkan semprotan cairan, biasanya air atau campuran kimia tertentu. Saat gas buang mengalir melewati alat ini, cairan disemprotkan langsung ke dalam aliran gas, sehingga partikel debu, asap, gas asam, logam berat, dan senyawa berbahaya seperti CO₂ dan VOC bisa tertangkap. Cairan yang membawa zat-zat berbahaya tersebut kemudian turun ke bagian bawah alat untuk dikumpulkan dan dibuang.

2. . Gliding Arc Plasma



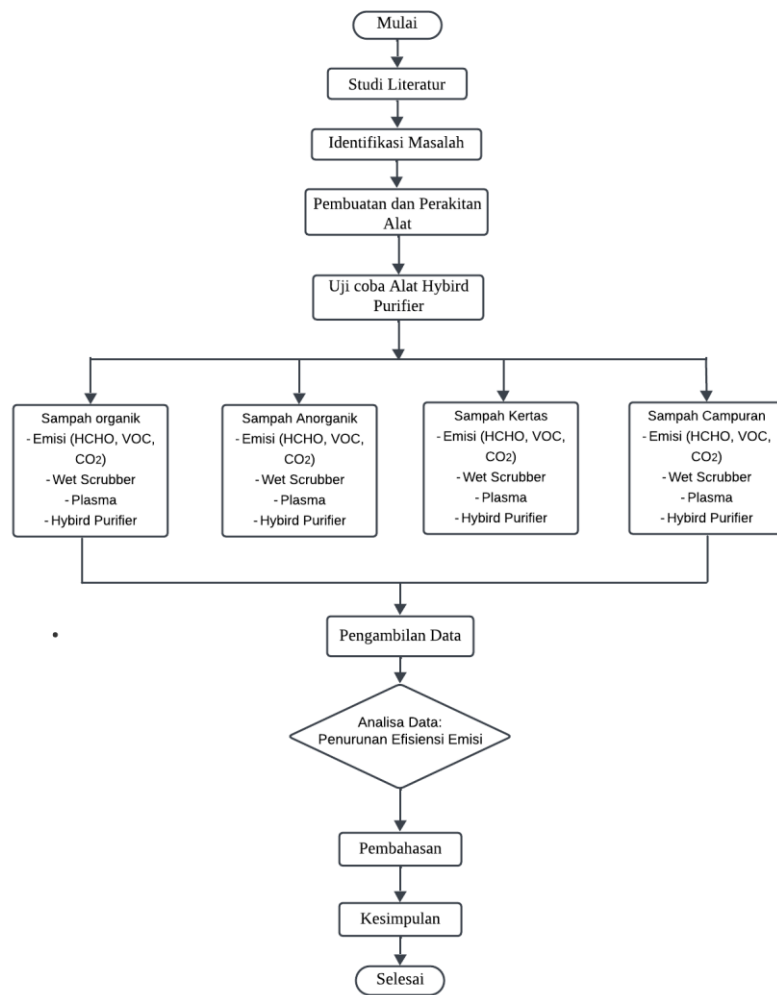
Gambar 3 Desain Alat Gliding Arc Plasma



Gambar 4 Alat Gliding Arc Plasma

Gliding arc Plasma adalah sebuah alat yang digunakan untuk membantu mengurangi polutan berbahaya dari gas buang menggunakan teknologi *Plasma* non-termal. Cara kerjanya yaitu dengan menciptakan medan listrik di antara dua elektroda, sehingga terbentuk busur listrik yang mengikuti aliran gas. Busur ini menghasilkan *Plasma* aktif yang mampu memicu reaksi kimia sangat cepat, yang kemudian memecah zat-zat berbahaya seperti VOC, HCHO, dan gas beracun lainnya menjadi senyawa yang lebih aman.

2.2 Flowchart Penelitian



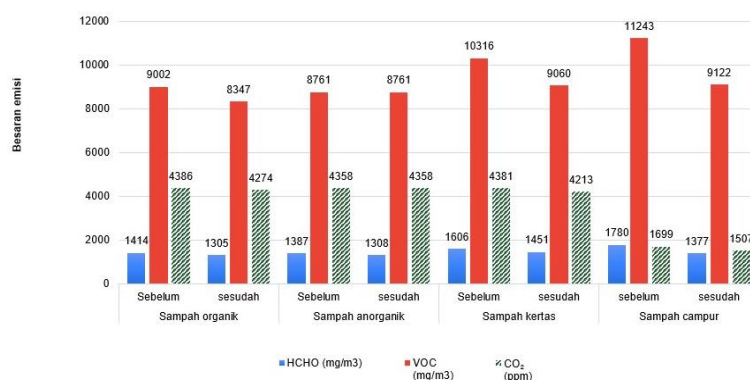
Gambar 5 Flowchart Penelitian

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Penurunan Emisi Wet Scrubber

Jenis sampah	Tahap pengukuran	HCHO (mg/m ³)	VOC (mg/m ³)	CO ₂ (ppm)
Organik	Sebelum	1414	9002	4386
	Sesudah	1305	8347	4274
Anorganik	Sebelum	1387	8761	4358
	Sesudah	1308	8234	4280
Kertas	Sebelum	1606	10316	4381
	sesudah	1451	9060	4213
Campur	sebelum	1780	11243	1699
	sesudah	1377	9122	1507

Data reduksi uji Emisi semua jenis sampah dengan metode wet scrubber



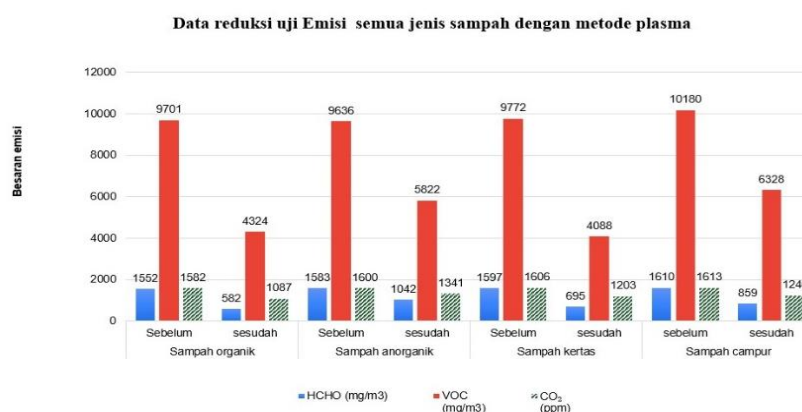
Gambar 6 Grafik Penurunan Emisi Wet Scruber HCHO, VOC, & CO₂

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Wet Scrubber mampu menurunkan kadar polutan HCHO, VOC, dan CO₂ pada seluruh jenis sampah, dengan penurunan terbesar terjadi pada sampah campuran terutama untuk VOC sebesar 2121 mg/m³. Namun, efektivitasnya masih terbatas karena metode ini lebih optimal untuk partikel larut air dibanding gas kompleks. Temuan ini sejalan dengan penelitian Dararat (2021) yang menyatakan bahwa wet scrubbing kurang efisien dalam mengurangi emisi gas seperti NO_x dan jelaga, sehingga diperlukan penerapan teknologi non-thermal plasma (NTP) yang lebih efektif dalam memecah molekul polutan dan meningkatkan efisiensi pemurnian udara.

3.2 Penurunan Emisi Plasma

Jenis sampah	Tahap pengukuran	HCHO (mg/m ³)	VOC (mg/m ³)	CO ₂ (ppm)
Organik	Sebelum	1552	9701	1582
	Sesudah	582	4324	1087
Anorganik	Sebelum	1583	9636	1600
	Sesudah	1042	5822	1341
Kertas	Sebelum	1597	9772	1606
	sesudah	695	4088	1203

Campur	sebelum	1610	10180	1613
	Sesudah	859	6328	1240



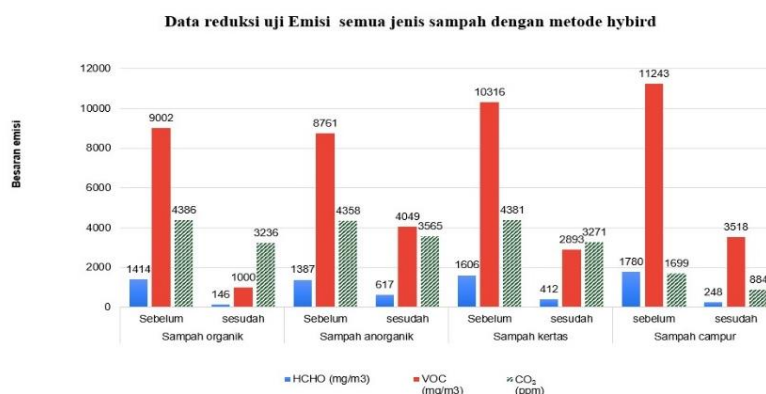
Gambar 7 Grafik Penurunan Emisi Plasma HCHO, VOC & CO₂

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Plasma secara signifikan menurunkan kadar HCHO, VOC, dan CO₂ pada seluruh jenis sampah, dengan penurunan terbesar pada parameter VOC sampah kertas sebesar 5684 mg/m³. Hal ini membuktikan bahwa teknologi plasma lebih efektif dibandingkan Wet Scrubber dalam menguraikan senyawa organik kompleks. Temuan ini sejalan dengan penelitian Agata (2024) yang menunjukkan bahwa reaktor non-thermal plasma gliding arc mampu menurunkan konsentrasi partikel hasil pembakaran diesel (250–580 nm) secara signifikan, terutama pada laju aliran udara rendah (14 L/menit) yang memperpanjang waktu tinggal partikel di dalam reaktor. Kedua hasil tersebut sama-sama menegaskan bahwa efisiensi sistem plasma sangat dipengaruhi oleh parameter operasi, seperti waktu tinggal dan intensitas energi, yang berperan penting dalam meningkatkan efektivitas penguraian polutan.

3.3 Penurunan Emisi Hybird Purifier

Jenis sampah	Tahap pengukuran	HCHO (mg/m ³)	VOC (mg/m ³)	CO ₂ (ppm)
Organik	Sebelum	1414	9002	4386
	Sesudah	146	1000	3236
Anorganik	Sebelum	1387	8761	4358
	Sesudah	617	4049	3565
Kertas	Sebelum	1606	10316	4381
	sesudah	412	2893	3271

campuran	sebelum	1780	11243	1699
	sesudah	248	3518	884



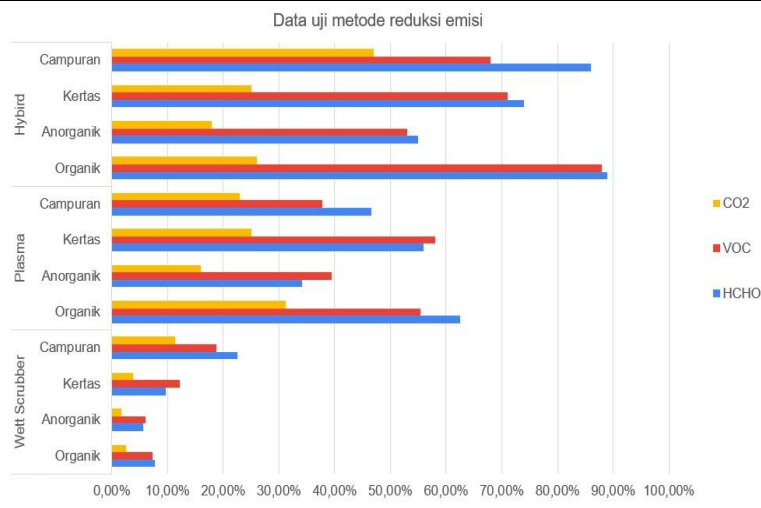
Gambar 8 Grafik Penurunan Emisi Hybrid HCHO, VOC, & CO₂

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Hybrid yang menggabungkan Wet Scrubber dan Gliding Arc Plasma memberikan penurunan emisi paling signifikan dibandingkan metode tunggal. Penurunan tertinggi terjadi pada parameter VOC, khususnya pada sampah organik dan campuran, masing-masing mencapai 8002 mg/m³ dan 7725 mg/m³. Kombinasi kedua teknologi ini terbukti meningkatkan efisiensi karena proses penyisihan fisik oleh cairan scrubber dilanjutkan dengan pemecahan molekul polutan oleh plasma non-termal. Hasil ini sejalan dengan penelitian Agata (2024) yang menunjukkan bahwa reaktor gliding arc plasma mampu secara efektif menurunkan konsentrasi partikel sisa pembakaran diesel dengan efisiensi yang meningkat pada waktu tinggal partikel lebih lama (aliran udara 14 L/menit). Dengan demikian, baik hasil penelitian ini maupun Agata menegaskan bahwa penggabungan proses dan pengaturan parameter operasi seperti laju aliran udara dan waktu tinggal sangat berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi pemurnian udara.

3.4 Pembahasan Efisiensi Penurunan Emisi

Tabel 1 Persentase Efisiensi Penurunan Emisi

Metode	Jenis Sampah	Emisi		
		HCHO	VOC	CO ₂
Wet Scrubber	Organik	7,70%	7,27%	2,55%
	Anorganik	5,60%	6,01%	1,78%
	Kertas	9,65%	12,17%	3,83%
	Campuran	22,6%	18,8%	11,3%
Plasma	Organik	62,5%	55,4%	31,2%
	Anorganik	34,1%	39,5%	16%
	Kertas	56%	58%	25%
	Campuran	46,6%	37,8%	23%
Hybird	Organik	89%	88%	26%
	Anorganik	55%	53%	18%
	Kertas	74%	71%	25%
	Campuran	86%	68%	47%



Gambar 9 Grafik Presentase Efisiensi Penurunan Emisi

Penjelasan Efisiensi Penurunan Emisi

Berdasarkan Tabel 4.24 dan grafik presentase efisiensi penurunan emisi pada Gambar 4.4, terlihat dengan jelas bahwa setiap metode memiliki efektivitas yang berbeda dalam menurunkan emisi HCHO, VOC, dan CO₂ pada berbagai jenis sampah (organik, anorganik, kertas, dan campuran).

Metode **Wet Scrubber** menunjukkan efisiensi penurunan emisi yang relatif rendah pada semua jenis sampah. Pada sampah organik, penurunan hanya mencapai HCHO 7,70%, VOC 7,27%, dan CO₂ 2,55%, sedangkan pada sampah anorganik berturut-turut sebesar HCHO 5,60%, VOC 6,01%, dan CO₂ 1,78%. Untuk sampah kertas, penurunan HCHO 9,65%, VOC 12,17%, dan CO₂ 3,83%, sementara sampah campuran menunjukkan efisiensi sedikit lebih tinggi yaitu HCHO 22,6%, VOC 18,8%, dan CO₂ 11,3%. Hal ini menegaskan bahwa Wet Scrubber lebih efektif menangkap polutan yang larut dalam air, namun kurang mampu menurunkan emisi gas seperti VOC dan CO₂ secara signifikan. Sebaliknya, **Metode Plasma** memperlihatkan peningkatan efisiensi yang jauh lebih baik, di mana pada sampah organik penurunan mencapai HCHO 62,5%, VOC 55,4%, dan CO₂ 31,2%, sementara pada sampah anorganik tercatat HCHO 34,1%, VOC 39,5%, dan CO₂ 16%. Pada sampah kertas, efisiensi lebih tinggi dengan penurunan HCHO 56%, VOC 58%, dan CO₂ 25%, sedangkan sampah campuran menunjukkan HCHO 46,6%, VOC 37,8%, dan CO₂ 23%. Peningkatan ini disebabkan oleh kemampuan plasma menghasilkan spesies reaktif seperti radikal O•, OH•, dan ozon (O₃) yang efektif menguraikan senyawa berbahaya. Adapun **Metode Hybrid** (kombinasi Wet Scrubber dan Plasma) memberikan hasil paling optimal dan konsisten di semua jenis sampah. Pada sampah organik, penurunan emisi mencapai HCHO 89%, VOC 88%, dan CO₂ 26%, sedangkan pada sampah anorganik HCHO 55%, VOC 53%, dan CO₂ 18%. Sampah kertas menunjukkan efisiensi HCHO 74%, VOC 71%, dan CO₂ 25%, sementara efisiensi tertinggi terjadi pada sampah campuran dengan penurunan HCHO 86%, VOC 68%, dan CO₂ 47%. Dengan demikian, metode Hybrid terbukti paling efektif karena mampu menekan polutan berbahaya secara signifikan, khususnya HCHO dan VOC yang hampir mencapai 90% pada sampah organik, serta penurunan CO₂ tertinggi sebesar 47% pada sampah campuran.

3.5 Standar Pencemaran Udara

Emisi	Baik (mg/m ³)	Sedang (mg/m ³)	Buruk (ppm)
CO ₂	0-1.000	1.001-2000	2.001-5.000
VOC	0-0.600	0.601-3000	3.001-1.2000
HCHO	0-0.100	0.101-0.500	0.501-1.999

Penjelasan Level Kualitas Emisi Udara

Berdasarkan Tabel 4.24 tentang efisiensi penurunan emisi dan mengacu pada kategori kualitas emisi udara (baik, sedang, buruk) dari Tabel 2.25, penilaian tiap metode adalah sebagai berikut:

Metode **Wet Scrubber** menunjukkan efisiensi penurunan emisi yang relatif rendah pada semua jenis sampah. Pada sampah organik, penurunan HCHO hanya 7,70%, VOC 7,27%, dan CO₂ 2,55%, sehingga kualitas udara berada pada kategori **Sedang–Buruk** dan belum memenuhi standar emisi yang baik. Sampah anorganik bahkan lebih rendah dengan HCHO 5,60%, VOC 6,01%, dan CO₂ 1,78%, menghasilkan kualitas emisi **Buruk** dengan konsentrasi polutan masih tinggi. Untuk sampah kertas, penurunan HCHO 9,65%, VOC 12,17%, dan CO₂ 3,83% sedikit lebih baik dibanding organik dan anorganik, tetapi tetap tergolong **Sedang–Buruk**. Hasil tertinggi Wet Scrubber dicapai pada sampah campuran dengan penurunan HCHO 22,6%, VOC 18,8%, dan CO₂ 11,3%, meskipun kualitas udara masih berada pada level **Sedang**. Berbeda dengan itu, metode **Plasma** memperlihatkan peningkatan efisiensi yang jauh lebih baik. Pada sampah organik, penurunan HCHO mencapai 62,5%, VOC 55,4%, dan CO₂ 31,2%, sehingga kualitas udara meningkat signifikan dan masuk kategori **Baik** sesuai standar ambien SNI. Pada sampah anorganik, penurunan HCHO 34,1%, VOC 39,5%, dan CO₂ 16% menurunkan emisi cukup besar sehingga kualitas udara berada di level **Sedang–Baik** mendekati standar ideal. Sampah kertas menunjukkan hasil yang tinggi dengan penurunan HCHO 56%, VOC 58%, dan CO₂ 25% yang menghasilkan kualitas **Baik**, sedangkan sampah campuran menurun sebesar HCHO 46,6%, VOC 37,8%, dan CO₂ 23% dengan kualitas udara mendekati **Baik**. Adapun metode **Hybrid Purifier** (kombinasi Wet Scrubber dan Plasma) terbukti paling efektif dan konsisten. Pada sampah organik, penurunan emisi sangat tinggi dengan HCHO 89%, VOC 88%, dan CO₂ 26%, menghasilkan kualitas udara **Baik** dan paling optimal. Sampah anorganik pun menunjukkan hasil baik dengan HCHO 55%, VOC 53%, dan CO₂ 18% yang stabil. Pada sampah kertas, efisiensi mencapai HCHO 74%, VOC 71%, dan CO₂ 25% dengan kualitas udara **Baik** dan lebih unggul dibanding plasma tunggal. Sementara itu, sampah campuran mencatat penurunan tertinggi dengan HCHO 86%, VOC 68%, dan CO₂ 47%, menjadikan kualitas udara berada pada kategori **Baik** dengan konsistensi yang sangat baik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengujian dan analisa yang telah diolah maka didapatkan kesimpulan bahwa:

Hasil penelitian menunjukkan perbandingan yang jelas antara tiga metode pemurnian gas buang, yaitu Wet Scrubber, Gliding Arc Plasma, dan Hybrid Purifier. Metode Wet Scrubber bekerja dengan mengikat partikel dan polutan melalui media cair, namun efisiensinya masih rendah. Pada pembakaran sampah organik, anorganik, dan kertas, penurunan emisi masing-masing hanya berkisar antara 1–12%, sehingga kualitas udara masih berada pada kategori **Sedang–Buruk** dan belum optimal untuk mengurangi polutan berbahaya. Penerapan Gliding Arc Plasma menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan metode sebelumnya, dengan efisiensi penurunan emisi mencapai 88,80% (HCHO), 88,10% (VOC), dan 24,20% (CO₂) pada sampah organik, serta hasil serupa pada jenis sampah lainnya yang menempatkan kualitas udara pada kategori **Baik**. Adapun kombinasi kedua metode, yaitu Hybrid Purifier (Wet Scrubber + Gliding Arc Plasma), memberikan kinerja paling efektif dan stabil dengan efisiensi penurunan mencapai 89% (HCHO), 88% (VOC), dan 26% (CO₂) pada sampah organik, serta efisiensi serupa pada jenis sampah lainnya. Hasil ini membuktikan bahwa sistem Hybrid Purifier mampu menghasilkan udara bersih dengan kualitas lebih baik dan stabil dibandingkan metode tunggal, sehingga direkomendasikan sebagai solusi yang efisien dan ramah lingkungan dalam pemurnian gas buang hasil pembakaran sampah.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing Bambang Sugiantoro, S.T., M.T. yang telah membantu penulis dalam merampungkan artikel pada Jurnal Rekayasa Mesin ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. J. Pinto, et.al, (2023) Gliding Arc Discharge for Emission Control in Swirl Fuel-lean Non-premixed Combustion. Combustion Science and Technology 195:6, pages

- 1235-1250.
- [2] Baiqiang Zhang, et.al, (2024), Recent progress in CO₂ splitting processes with non-thermal plasma-assisted. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2024, 12 (6), 114692.
 - [3] Bin Zhu, Lu-Yao Zhang, et.al, (2020), High-performance of plasma-catalysis hybrid system for toluene removal in air using supported Au nanocatalysts, *Chemical Engineering Journal*, Volume 381,122599, ISSN 1385-8947.
 - [4] Dararat Laohalert decha, et.al, (2021), The Prototype of Non-thermal Plasma After treatment System for Simultaneous Reduction of Nitrogen Oxide Emission in Flue Gas, *E3S Web Conf.* Volume 302, Research, Invention, and Innovation Congress
 - [5] Denver J. Haycock, et.al, (2025), Fundamental insights and emerging opportunities in plasma catalysis for light alkane conversion. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 2025, 51, 100987.
 - [6] Dorosz, A., Penconek, A., & Moskal, A. (2024). Cold Plasma Gliding Arc Reactor System for Nanoparticles' Removal from Diesel Cars' Exhaust Gases. *Processes*, 12(9), 1841. <https://doi.org/10.3390/pr12091841>
 - [7] Durme, J. V., et.al (2009). Post-plasma catalytic technology for the removal of toluenefrom indoor air: Effect of humidity. *Appl. Catal.B Environ.* 87 (1):78–83.
 - [8] Gong, Xet.al, (2020), Decomposition of volatile organic compounds using gliding arc discharge plasma. *J. Air Waste Manag.* 2020, 70, 138–157.
 - [9] Gunawan, Bambang Sugiantoro, Ngisomudin, Warso, Nana Supriyana, (2024), Optimasi Vortex Wet Scrubber dengan Suspensi Dolomit untuk Penangkapan Partikel Karbon Ultrafine dan Polutan Asam yang Lebih Efisien, *Iteks* vol 16 No 2,
 - [10] Jones, A., & Harrison, R. (2016). Emission of Ultrafine Particles from the Incineration of Municipal Solid Waste: A Review, *Atmospheric Environment*, 140, 519-528.
 - [11] Ken-Lin Chang, et.al, (2019), Effects of atmospheric-plasma system on energy efficiency improvement and emissions reduction from a diesel engine, *Journal of Environmental Management*, Volume 234, Pages 336-344.
 - [12] Ordudari Z, Rismanchian M. (2023), Review of the application of plasma technology in air pollution control. *tkj* 2023; 15 (3) 8.
 - [13] Shirjana Saud, et.al, (2023) A comprehensive study on scaling up ethylene abatement via intermittent plasma-catalytic discharge process in a novel reactor configuration comprising multiple honeycomb monoliths, *Chemical Engineering Journal*, Volume 454 No. 4,
 - [14] Xiangjie Gong, et.al, (2020) Decomposition of volatile organic compounds using gliding arc discharge plasma, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70:2, 138-157, DOI: 10.1080/10962247.2019.1698476
 - [15] Xinmo Xu, et.al, (2024), Study on the parameters of non-thermal plasma degradation process based on the combination of simulation and experiment, *J. Radiation Effects and Defects in Solids*.
 - [16] Yao, S, et.al, (2017), Sustainable Removal of Particulate Matter from Diesel Engine Exhaust at Low Temperature Using a Plasma-Catalytic Method. *Chem. Eng. J.* 2017, 327, 343– 350, DOI: 10.1016/j.cej.2017.06.122
 - [17] Yunxi Shi, et.al, (2022), Effects of removing carbon particles of different size with nonthermal plasma generated by packed-bed dielectric barrier discharge reactor, *Chemical Engineering Science*, Volume 250, 15 March 2022.
 - [18] Yu Miao, et.al, (2023), Application-oriented non-thermal plasma in chemical reaction engineering: A review, *Green Energy and Resources*, Volume 1, Issue 1, March 2023, 10