

# Kinerja Wet Scrubber sebagai Teknologi Pengendalian Emisi Insinerator dalam Mewujudkan K3 dan Keberlanjutan Lingkungan

Gunawan<sup>1\*</sup>, Rahmawati<sup>2</sup>, Supardin<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe  
Jln. B. Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

<sup>1\*</sup>gunawan.samin@gmail.com

**Abstrak**— Insinerator sampah merupakan salah satu solusi dalam pengelolaan limbah padat, namun proses pembakarannya menghasilkan gas berbahaya yang berisiko mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menguji sistem wet scrubber untuk menurunkan konsentrasi emisi gas, khususnya karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dari proses insinerasi. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui tahapan kajian literatur, perancangan dan pembuatan prototipe wet scrubber, instalasi pada insinerator, serta pengujian kinerja dengan parameter konsentrasi gas buang dan pH air penyerap. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi CO awal 500 ppm berhasil diturunkan hingga <70 ppm pada sirkulasi ketiga (15 menit), sedangkan CO<sub>2</sub> dari 6000 ppm turun di bawah ambang batas aman sejak sirkulasi pertama dan stabil hingga 345 ppm pada sirkulasi kedelapan (40 menit). Nilai pH air menurun dari 6,9 menjadi 3,2 meningkatkan efektivitas absorpsi namun memerlukan pengendalian agar tidak menimbulkan korosi. Pemantauan emisi gas buang (CO dan CO<sub>2</sub>) beserta pH cairan penyerap dapat diintegrasikan ke dalam sistem manajemen Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan (K3L). Dari segi lingkungan, penurunan signifikan emisi gas berbahaya memastikan gas buang berada dalam baku mutu sesuai standar, sehingga berkontribusi pada pengendalian polusi udara, penekanan emisi gas rumah kaca, serta perlindungan ekosistem di sekitar area insinerator. Dari sisi K3, scrubber menurunkan risiko paparan gas beracun, meskipun masih diperlukan pemantauan gas *real-time* dan prosedur aman penggantian air. Penelitian ini masih terbatas pada skala laboratorium sehingga diperlukan uji lapangan jangka panjang, optimasi kontrol pH, dan integrasi sensor otomatis. Meski demikian, wet scrubber sederhana terbukti efektif menurunkan polutan, mendukung keberlanjutan, meningkatkan aspek K3 dan lingkungan, serta berpotensi diterapkan pada insinerator skala komunitas untuk mendukung pengelolaan limbah ramah lingkungan.

**Kata kunci**— Insinerator sampah, emisi gas buang, wet scrubber, karbon monoksida, karbon dioksida, K3L

**Abstract**— Waste incinerators are one solution in solid waste management, but the combustion process produces hazardous gases that pose a risk of environmental pollution and health hazards. This study aims to develop and test a wet scrubber system to reduce the concentration of gas emissions, especially carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), from the incineration process. The research method was carried out experimentally through stages of literature review, design and manufacture of a wet scrubber prototype, installation in the incinerator, and performance testing with parameters of flue gas concentration and pH of the absorbent water. The results showed that the initial CO concentration of 500 ppm was successfully reduced to <70 ppm in the third circulation (15 minutes), while CO<sub>2</sub> from 6000 ppm fell below the safe threshold since the first circulation and stabilized to 345 ppm in the eighth circulation (40 minutes). The water pH value decreased from 6.9 to 3.2 increasing the effectiveness of absorption but requires control to prevent corrosion. Monitoring of flue gas emissions (CO and CO<sub>2</sub>) along with the pH of the absorbent liquid can be integrated into the Occupational Safety, Health, and Environment (OSHE) management system. From an environmental perspective, the significant reduction in hazardous gas emissions ensures that exhaust gases are within standard quality standards, thus contributing to air pollution control, greenhouse gas emissions suppression, and ecosystem protection around the incinerator area. From an OHS perspective, scrubbers reduce the risk of toxic gas exposure, although real-time gas monitoring and safe water replacement procedures are still required. This research is still limited to a laboratory scale, so long-term field testing, pH control optimization, and automatic sensor integration are needed. Nevertheless, simple wet scrubbers have proven effective in reducing pollutants, supporting sustainability, improving OHS and environmental aspects, and have the potential to be applied to community-scale incinerators to support environmentally friendly waste management.

**Keywords**— Waste incinerator, flue gas emission, wet scrubber, carbon monoxide, carbon dioxide, air pollution control

## I. PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah padat menjadi salah satu tantangan serius dalam pembangunan berkelanjutan. Insinerator dipandang sebagai solusi yang relatif efektif karena mampu mengurangi volume sampah hingga 90% dan menghasilkan residu abu dalam jumlah lebih sedikit [1]. Namun demikian, proses pembakaran pada insinerator tidak terlepas dari permasalahan emisi gas buang yang mengandung senyawa berbahaya, seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Gas-gas ini berpotensi menurunkan kualitas udara, menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia, serta mencemari lingkungan sekitar. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengendalian emisi yang mampu menekan risiko tersebut agar insinerator dapat berfungsi optimal sekaligus ramah lingkungan.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem scrubber merupakan salah satu teknologi efektif dalam menurunkan emisi gas buang insinerator. Scrubber bekerja dengan prinsip absorpsi, yaitu menyempatkan cairan (air atau larutan kimia) ke dalam aliran gas buang untuk menangkap polutan. Penurunan tertinggi diperoleh pada penggunaan absorben KOH 6N dengan media pall ring 40 cm, yaitu sebesar 97,9% untuk CO dan 96,0% untuk CO<sub>2</sub>. [2]. Meskipun demikian, efektivitas scrubber sangat bergantung pada rancangan sistem, kondisi operasional, serta keberlanjutan perawatan, termasuk pengelolaan air sirkulasi dan pemantauan pH.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji prototipe wet scrubber pada insinerator sampah skala laboratorium. Fokus utama penelitian adalah menganalisis efektivitas scrubber dalam menurunkan konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> serta memantau

perubahan pH air sirkulasi sebagai parameter pendukung. Selain itu, penelitian ini juga dimaksudkan untuk menyusun rekomendasi protokol pengoperasian scrubber yang praktis, aman, dan berkelanjutan sehingga dapat diterapkan pada insinerator skala komunitas maupun industri kecil. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi pengendalian polusi udara berbasis insinerator ramah lingkungan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan eksperimental untuk menguji efektivitas wet scrubber dalam menurunkan emisi gas buang insinerator. Tahapan penelitian diawali dengan kajian literatur yang mencakup teori insinerator, jenis gas berbahaya yang dihasilkan seperti CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan SO<sub>2</sub>, serta prinsip kerja scrubber yang telah banyak diterapkan pada berbagai industri. Selain itu, standar emisi dan regulasi lingkungan juga dikaji sebagai acuan dalam menentukan parameter keberhasilan sistem. Model filter cerobong asap dengan laju penyemprotan air 4 liter/menit terbukti efektif menurunkan emisi polutan udara berupa Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Karbon Monoksida (CO) hingga berada di bawah ambang batas baku mutu emisi [3].

Selanjutnya, dilakukan perancangan dan pembuatan prototipe wet scrubber dengan komponen utama berupa ruang siklon penyemprot air (*cyclone wet scrubber*), pompa sirkulasi air, nozzle penyemprot, serta bak filter dua ruang yang berfungsi untuk memisahkan air kotor dan air bersih sebelum digunakan kembali. Rancangan ini dirancang agar gas buang dari ruang bakar insinerator dialirkan menuju scrubber, kemudian disemprot dengan air sehingga partikel debu maupun gas berbahaya dapat diikat sebelum gas dilepaskan ke udara.

Tahap berikutnya adalah instalasi sistem scrubber pada insinerator skala laboratorium. Insinerator yang digunakan beroperasi dengan sistem pembakaran batch menggunakan sampah organik basah sekitar 7,5 kg per siklus. Gas hasil pembakaran dialirkan melalui pipa ke dalam scrubber dan dilepaskan melalui cerobong setelah proses penyaringan.

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja scrubber dengan dua parameter utama, yaitu konsentrasi gas buang (CO dan CO<sub>2</sub>) serta pH air sirkulasi. Konsentrasi gas diukur menggunakan sensor digital sebelum dan sesudah melewati scrubber pada interval waktu tertentu (0–9 menit) serta setelah melalui delapan kali sirkulasi (hingga 40 menit). Sementara itu, pH air diukur menggunakan pH meter pada setiap siklus untuk memantau perubahan keasaman air akibat reaksi dengan gas buang.

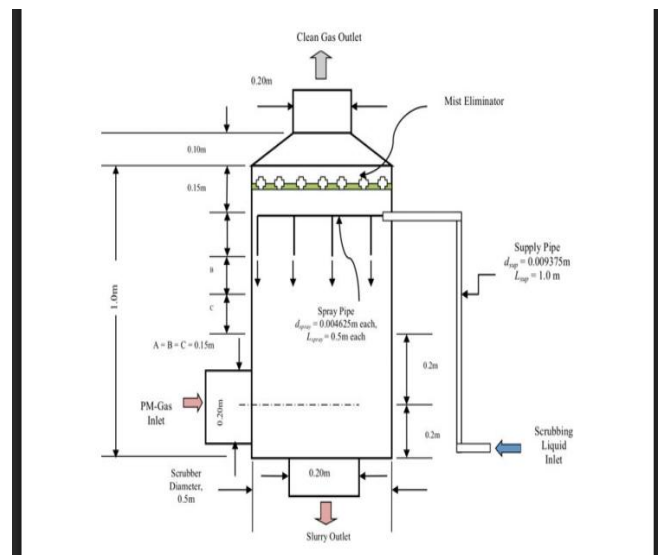
Data hasil pengukuran dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui persentase penurunan konsentrasi gas serta peran perubahan pH dalam meningkatkan efektivitas pembersihan. Seluruh hasil pengujian dibandingkan dengan ambang batas aman emisi sesuai standar lingkungan, sehingga dapat disusun rekomendasi protokol operasional scrubber yang lebih efektif, praktis, dan berkelanjutan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe wet scrubber yang dirancang dan diuji pada insinerator sampah skala laboratorium menjadi fokus utama hasil penelitian ini. Analisis difokuskan pada efektivitas penurunan emisi gas buang, kualitas air sirkulasi, serta potensi penerapan sistem secara berkelanjutan.

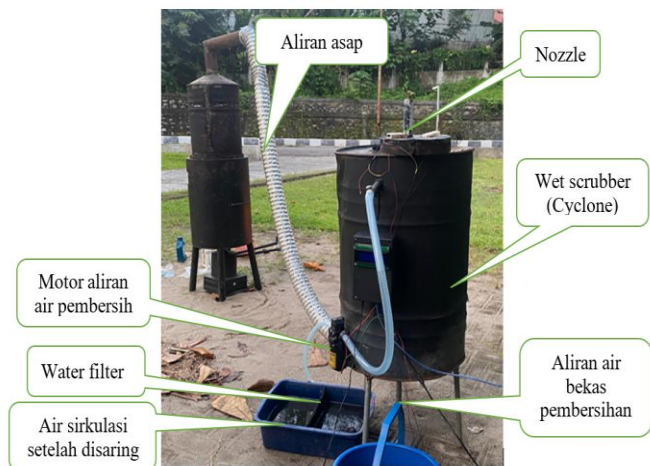
A. Desain Konseptual Scrubber

Prototipe *wet scrubber* dirancang dengan konsep penyemprotan air pada aliran gas buang untuk mengikat polutan sebelum dilepaskan ke atmosfer. Sistem ini terdiri atas ruang siklon (*cyclone wet scrubber*), pompa air sirkulasi, *nozzle* penyemprot, serta bak filter dua ruang untuk memisahkan air bersih dan air kotor [4]. Gas hasil pembakaran dialirkan dari insinerator menuju scrubber melalui pipa, kemudian disemprot dengan air sehingga partikel maupun gas berbahaya dapat tertangkap. Desain ini dibuat sederhana namun fungsional agar sesuai dengan kebutuhan insinerator skala komunitas.



Gambar 1. Sketsa geometris sistem scrubber [4].

Wet scrubber dengan sistem penyemprotan air digunakan untuk menurunkan emisi gas buang. Namun, perbedaan utama penelitian ini terletak pada penyederhanaan desain yang menitikberatkan pada aspek keterjangkauan dan kemudahan perawatan, sehingga cocok untuk skala komunitas. Walaupun prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini hanya menggunakan satu tahap penyemprotan, hasil pengujian menunjukkan bahwa rancangan sederhana sudah cukup efektif dalam mengurangi CO dan CO<sub>2</sub> hingga berada di bawah ambang batas aman. Gambar 2 menampilkan desain konseptual wet scrubber.



Gambar 2. Desain konseptual wet scrubber

Desain konseptual yang diusulkan tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga memiliki nilai praktis karena dapat diimplementasikan pada insinerator sederhana yang umum digunakan di masyarakat. Hal ini memperlihatkan kontribusi baru dalam literatur berupa pendekatan desain yang menyeimbangkan efektivitas teknis dengan kemudahan penerapan di lapangan.

**B. Analisis Efektivitas Scrubber**

Analisis efektivitas scrubber dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam menurunkan konsentrasi polutan hasil pembakaran insinerator. Evaluasi difokuskan pada perbandingan kadar gas buang sebelum dan sesudah melewati scrubber, sehingga diperoleh gambaran kuantitatif mengenai kinerja penyisihan polutan serta kesesuaiannya dengan standar emisi. Proses pembakaran dilakukan secara batch dengan sampah organik basah seberat 7,5 kg, di mana asap yang dihasilkan dialirkan melalui pipa menuju scrubber untuk disaring menggunakan media air. Pengukuran konsentrasi gas, khususnya CO dan CO<sub>2</sub>, bertujuan menilai efektivitas penyemprotan air dalam menurunkan kadar polutan, dengan hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi gas buang

Waktu (Menit)	Konsentrasi gas sebelum scrubber		Konsentrasi gas sesudah scrubber	
	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
0	0	400	0.00	360.0
1	0	403	0.00	362.7
2	25	1900	16.25	1710.0
3	0	410	0.00	369.0
4	0	410	0.00	369.0
5	0	405	0.00	364.5
6	25	1908	16.25	1717.2
7	286	5465	185.9	4918.5
8	66	4150	42.9	3735.0
9	500	6000	325.0	5400.0

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi CO sebelum scrubber mencapai 0–500 ppm, sedangkan setelah melewati scrubber turun signifikan menjadi 0–325 ppm. Pada beberapa titik pengukuran, konsentrasi CO bahkan tercatat 0 ppm, yang menandakan efektivitas sistem sangat tinggi, meskipun pada beban pembakaran tinggi (menit 7–9) penurunannya tidak mencapai nol. Sementara itu, CO<sub>2</sub> mengalami penurunan dari 400–6000 ppm sebelum scrubber menjadi 360–5400 ppm setelah scrubber. Penurunan CO<sub>2</sub> relatif lebih kecil dibandingkan CO, namun tetap menunjukkan efisiensi, terutama pada konsentrasi tinggi. Perbedaan efektivitas ini dipengaruhi oleh sifat fisik-kimia kedua gas, di mana CO lebih mudah diadsorpsi atau teroksidasi dalam media air. Selain itu, variasi konsentrasi gas pada menit tertentu diduga terkait dengan fluktuasi proses pembakaran atau beban sistem. Secara keseluruhan, hasil multi-sirkulasi memperlihatkan bahwa wet scrubber mampu menurunkan konsentrasi polutan secara konsisten pada setiap tahap sirkulasi. Wet scrubber ventury yang diterapkan sebagai alat pengendali emisi pada industri peleburan baja di Cilegon–Banten memiliki tingkat efisiensi hingga 99% [5], namun venturi scrubber lebih mahal dari spray tower, cyclonic, tray tower scrubber. Dalam penelitian ini, menggunakan wet scrubber yang lebih sederhana yaitu model penyemprotan air (spray tower). Scrubber spray tower ini memiliki efektivitas penurunan CO hingga lebih dari 85% dalam waktu singkat menunjukkan bahwa rancangan sederhana tetap mampu memberikan hasil yang sebanding dengan sistem yang lebih kompleks.

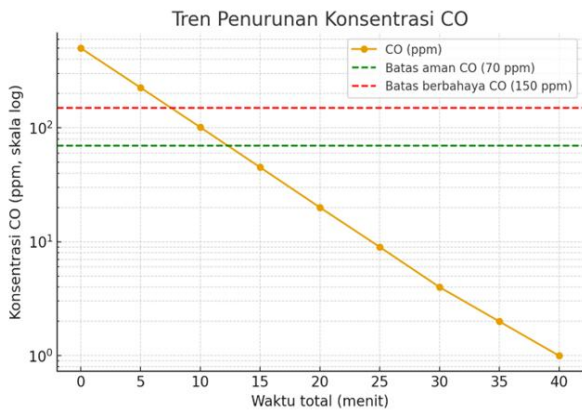
Setelah proses pembakaran sampah pada insinerator selesai pada menit ke-9, masih terdapat sisa asap yang tertahan di dalam scrubber. Kondisi ini menjadi penting untuk dianalisis karena memperlihatkan bagaimana sistem melakukan penyisihan gas berbahaya secara berulang. Oleh karena itu, konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada menit ke-9 dijadikan titik acuan untuk mengevaluasi efektivitas setiap siklus sirkulasi scrubber. Nilai konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada titik waktu t = 9 menit (kondisi awal: CO = 500 ppm, CO<sub>2</sub> = 6000 ppm) setelah tiap sirkulasi berulang pada wet-scrubber. Perubahan konsentrasi kedua gas setelah tiap sirkulasi berulang dipantau untuk menilai efektivitas sistem, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> setiap sirkulasi scrubber

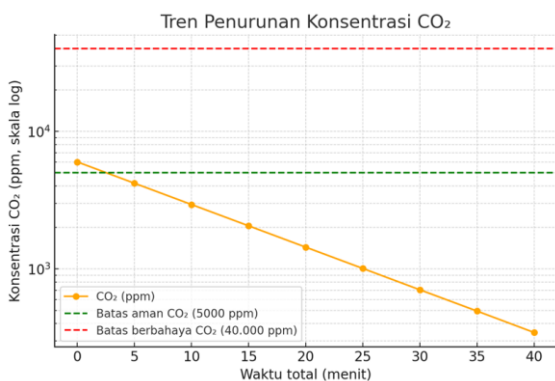
Sirkulasi ke	Waktu (menit)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
0	0	500	6000.0
1	5	225	4200.0
2	10	101	2940.0
3	15	45	2058.0
4	20	20	1440
5	25	9	1008
6	30	4	705
7	35	2	494
8	40	1	345

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi awal gas buang insinerator sangat berbahaya, dengan CO mencapai 500 ppm (kategori mematikan) dan CO<sub>2</sub> sebesar 6000 ppm

(kategori berbahaya) [6]. Setelah melalui sirkulasi pertama, CO turun menjadi 225 ppm meskipun masih berbahaya, sementara CO<sub>2</sub> menurun ke 4200 ppm yang sudah masuk kategori aman. Penurunan berlanjut pada sirkulasi kedua hingga CO mencapai 101 ppm dan CO<sub>2</sub> 2940 ppm, keduanya menunjukkan tren menuju kondisi aman. Pada sirkulasi ketiga, CO sudah berada pada level aman 45 ppm dan terus menurun hingga mendekati 1 ppm pada sirkulasi kedelapan. Demikian pula, CO<sub>2</sub> terus berkurang hingga mencapai 345 ppm pada sirkulasi kedelapan, jauh di bawah ambang batas. Hasil ini menegaskan bahwa wet scrubber mampu menurunkan konsentrasi gas berbahaya secara konsisten hingga berada pada level yang aman bagi lingkungan. Penurunan konsentrasi CO dari kondisi awal 500 ppm (kategori mematikan) hingga berada di bawah batas aman <70 ppm setelah sekitar 15 menit (sirkulasi ke-3). penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> dari 6000 ppm (kategori berbahaya) menjadi jauh di bawah batas aman 5000 ppm sejak sirkulasi pertama, dan terus menurun hingga 345 ppm pada sirkulasi ke-8. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas scrubber tidak hanya terlihat pada tahap awal, tetapi juga terjaga secara stabil sepanjang siklus operasi. Dengan demikian, sistem ini layak diterapkan untuk mendukung pengoperasian insinerator yang aman, sehat, dan ramah lingkungan. Tren penurunan konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> pada sirkulasi berulang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Konsentrasi CO pada sirkulasi berulang



Gambar 3. Konsentrasi CO<sub>2</sub> pada sirkulasi berulang

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa rancangan wet scrubber sederhana mampu mencapai efektivitas yang sangat baik, yakni menurunkan konsentrasi CO hingga 99,8% dan CO<sub>2</sub> sebesar 94,3% setelah 40 menit operasi atau delapan kali sirkulasi. Studi [2] menunjukkan kinerja serupa dengan penurunan CO sebesar 97,9% dan CO<sub>2</sub> sebesar 96,0% hanya melalui satu kali penyemprotan menggunakan absorbent alkali, sehingga capaian penelitian ini dapat dikatakan sebanding meskipun menggunakan metode yang lebih sederhana.

Faktor yang memengaruhi efisiensi *wet scrubber* antara lain kondisi operasional, seperti debit gas, kecepatan kontak, suhu, dan waktu tinggal yang menentukan intensitas interaksi gas dengan cairan penyerap, kondisi cairan penyerap, yang meliputi komposisi kimia, nilai pH, serta tingkat kejenuhan larutan yang berpengaruh terhadap kemampuan menyerap gas berbahaya, serta desain alat, yang mencakup jumlah tahap atau sirkulasi dan luas bidang kontak, yang menentukan seberapa besar peluang gas terikat oleh cairan penyerap sebelum dilepaskan ke lingkungan.

Selain itu, keberlanjutan kinerja juga dipengaruhi oleh frekuensi pemeliharaan dan penggantian media penyerap yang dapat menurunkan efisiensi bila diabaikan. Faktor eksternal seperti variasi komposisi sampah yang dibakar juga dapat memengaruhi beban pencemar yang harus ditangani oleh scrubber. Perbandingan hasil penelitian ini dengan studi terdahulu menunjukkan bahwa desain sederhana tetap mampu memberikan hasil yang kompetitif, terutama pada konteks insinerator skala komunitas. Oleh karena itu, upaya optimasi lebih lanjut perlu difokuskan pada integrasi sensor pemantauan real-time dan sistem kontrol otomatis untuk meningkatkan stabilitas kinerja scrubber. Faktor-faktor yang berperan dalam menentukan efisiensi wet scrubber dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Faktor yang mempengaruhi efisiensi wet scrubber

Faktor	Dampak terhadap efisiensi	Strategi optimalisasi
Debit dan kecepatan gas	Aliran gas terlalu cepat mengakibatkan waktu kontak pendek, efisiensi rendah, terlalu lambat sehingga kapasitas penanganan kecil	Menyesuaikan debit gas dengan kapasitas semprot cairan; memasang flow controller
Suhu dan tekanan gas	Suhu tinggi menurunkan kelarutan gas (CO, CO <sub>2</sub> ); tekanan tidak stabil mengurangi homogenitas distribusi gas	Pre-cooling sebelum masuk scrubber; menjaga tekanan operasi stabil
Waktu kontak gas-cair	Waktu kontak singkat sehingga penyerapan tidak optimal	Menambah panjang lintasan aliran gas; memperbesar volume ruang scrubber
Komposisi cairan penyerap (pH dan	pH rendah meningkatkan penyerapan CO <sub>2</sub> namun	Monitoring pH; penggantian/penambahan air bila pH <4,5; penggunaan larutan buffer

kejenuhan)	mempercepat korosi; cairan jenuh mengakibatkan kapasitas penyerapan menurun	ringan
Desain peralatan (nozzle dan multi-stage)	Droplet besar, maka area kontak kecil; tanpa multi-sirkulasi maka penurunan terbatas	Nozzle semprot halus; desain multi-sirkulasi/multi-stage; kombinasi dengan water filter
Pemeliharaan sistem	Fouling, scaling, dan penyumbatan nozzle menurunkan performa	Pembersihan rutin bak filter; perawatan nozzle dan pipa distribusi; inspeksi berkala
Kualitas air sirkulasi	Air kotor/jenuh mengurangi kemampuan scrubbing; pH turun cepat	Sirkulasi air melalui filter; sistem daur ulang dengan pengendalian kualitas air

Prototipe dalam penelitian ini menggunakan satu tahap penyemprotan, efektivitas yang dicapai menunjukkan kinerja yang kompetitif dan layak dipertimbangkan untuk penerapan pada insinerator skala komunitas. Ke depan, pengembangan sistem dapat diarahkan pada penggunaan absorbent alkali untuk mempercepat proses penyerapan dan penerapan desain multi-tahap agar kontak gas dan media cair lebih intensif. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan sistem yang tidak hanya efektif, tetapi juga lebih responsif dan efisien dari sisi waktu operasi.

C. Pengujian kualitas air bak sirkulasi

Pengujian ini dilakukan untuk menilai efektivitas sistem dalam menjaga kualitas air penyemprot pada wet scrubber dengan fokus pada pengukuran pH sebagai indikator kelayakan penggunaan. Nilai pH diukur menggunakan pH meter setelah air melewati media penyaringan pada setiap siklus penyemprotan selama delapan kali sirkulasi, masing-masing berdurasi 5 menit. Pengukuran awal dilakukan saat kondisi air masih normal (0 menit), kemudian dilanjutkan pada setiap siklus berikutnya hingga hasilnya ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai pH air pada setiap sirkulasi

Sirkulasi	Waktu total (menit)	Nilai pH
0	0	6,9
1	5	5,6
2	10	5,0
3	15	4,5
4	20	4,5
5	25	3,7
6	30	3,4
7	35	3,2
8	40	3,2

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa semakin sering air digunakan untuk menyemprot polutan, nilai pH cenderung menurun sehingga menjadi lebih asam. Kondisi ini terjadi akibat interaksi antara air dengan senyawa polutan yang larut selama proses penyaringan [7]. Pada sistem scrubber ini, air sirkulasi menunjukkan tingkat keasaman cukup tinggi (pH 3–4), yang membuatnya efektif dalam menyerap CO<sub>2</sub> dari gas buang [8]. Adapun penurunan CO lebih dipengaruhi oleh mekanisme kontak fisik dengan air dibandingkan reaksi kimia [2]. Namun demikian, pH yang terlalu rendah dapat menimbulkan risiko kerusakan pada peralatan, sehingga sistem dilengkapi dengan pemantauan pH. Untuk menjaga kondisi operasi tetap aman, penggantian atau penambahan air dilakukan ketika pH turun di bawah 4,5 [9].

D. Pengoperasian Insinerator Berkelanjutan dengan Wet Scrubber untuk K3 dan Lingkungan

Berdasarkan analisis data konsentrasi gas dan pH air sirkulasi pada sistem scrubber, beberapa temuan utama dapat dijadikan dasar rekomendasi dan protokol operasional insinerator. Pertama, dari sisi efektivitas pengendalian emisi gas, konsentrasi CO dan CO<sub>2</sub> menunjukkan penurunan signifikan setelah melewati scrubber; CO, yang awalnya mencapai 500 ppm, berhasil turun di bawah batas aman <70 ppm pada sirkulasi ketiga, sedangkan CO<sub>2</sub>, yang awalnya berbahaya (>5000 ppm), menurun secara konsisten hingga jauh di bawah ambang batas sehingga melindungi pekerja dari risiko paparan berbahaya. Hal ini menegaskan bahwa sistem scrubber efektif dalam mengurangi paparan gas berbahaya, sehingga risiko dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan operator dapat diminimalkan.

Kedua, peran pH air sirkulasi sangat penting. Air sirkulasi dengan pH awal 6,9 menurun menjadi 3–4 selama kontak dengan gas, yang mendukung kelarutan CO<sub>2</sub> dan meningkatkan efisiensi penghilangan gas [10]. Namun, penurunan pH yang terlalu ekstrem berpotensi menimbulkan korosi pada peralatan, sehingga pemantauan pH secara berkala dan penggantian atau penambahan air saat pH <4,5 menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan operasional scrubber.

Dari sisi lingkungan, *wet scrubber* menurunkan emisi gas berbahaya dalam rentang baku mutu sesuai PermenLH No. 21 Tahun 2008, sehingga mengurangi pencemaran udara, emisi gas rumah kaca, dan dampak terhadap ekosistem. Namun, penurunan pH air penyerap hingga 3,2 berpotensi menimbulkan pencemaran sekunder bila limbah cair tidak dikelola. Karena itu, diperlukan pengolahan limbah cair melalui netralisasi atau daur ulang, serta integrasi dengan standar lingkungan seperti ISO 14001 untuk memperkuat praktik ramah lingkungan.

Ketiga, protokol pengoperasian yang disarankan mencakup pemantauan rutin konsentrasi CO, CO<sub>2</sub>, dan pH air pada setiap sirkulasi atau interval waktu tertentu, penggantian atau penambahan air dan buffer ringan bila pH turun di bawah 4,5, serta pemeliharaan rutin berupa pembersihan bak filter dan kapas filter untuk mencegah penyumbatan dan penurunan efisiensi scrubber. Pengendalian emisi gas melalui scrubber yang dilengkapi pemantauan pH, penggantian air tepat waktu,

dan pemeliharaan rutin memungkinkan insinerator beroperasi dengan dampak lingkungan minimal dan keberlanjutan operasional yang terjaga.

Keempat, dengan penerapan protokol ini, insinerator dapat beroperasi secara aman dan berkelanjutan karena risiko korosi peralatan diminimalkan, kualitas udara hasil proses tetap di bawah ambang batas berbahaya, dan efisiensi scrubber terjaga. Rekomendasi ini mendukung pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan sekaligus memastikan kesehatan dan keselamatan operator. Sistem penurunan CO dan CO<sub>2</sub> berfungsi sebagai *engineering control* dalam hierarki K3, sedangkan pemantauan pH dan debit gas berperan sebagai *administrative control* untuk menjaga kestabilan operasi dan keselamatan pekerja [11].

Pengoperasian insinerator dengan scrubber untuk keberlanjutan menekankan pentingnya integrasi teknologi pengendalian emisi agar proses pembakaran tidak hanya efektif dalam mengurangi volume sampah, tetapi juga ramah lingkungan. Penggunaan scrubber memastikan gas buang yang dilepas memenuhi standar kualitas udara dengan menurunkan partikel, CO, dan CO<sub>2</sub>. Dengan demikian, keberlanjutan dapat tercapai melalui kombinasi efisiensi pengelolaan sampah, perlindungan lingkungan, serta peningkatan kesehatan dan keselamatan masyarakat sekitar.

Secara keseluruhan, keberlanjutan operasional insinerator dengan wet scrubber sangat ditentukan oleh kemampuan menjaga keseimbangan antara kinerja teknis, perawatan rutin, dan pengelolaan limbah cair. Integrasi dengan teknologi lain akan memperkuat sistem sehingga tidak hanya efektif dalam jangka pendek, tetapi juga layak secara berkelanjutan untuk operasional insinerator di masa depan.

Monitoring emisi gas buang (CO, CO<sub>2</sub>) serta pH cairan penyerap dapat dijadikan bagian dari sistem manajemen K3L yang terintegrasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menunjukkan efektivitas teknologi scrubber dalam menurunkan emisi, tetapi juga menegaskan perannya dalam mendukung operasi insinerator yang berkelanjutan, aman bagi pekerja, dan ramah lingkungan.

#### E. Keterbatasan dan Rekomendasi

Penerapan wet scrubber dalam insinerator sampah masih menghadapi beberapa keterbatasan. Salah satunya adalah penurunan efisiensi setelah sistem beroperasi dalam jangka waktu tertentu, yang ditandai dengan kejenuhan cairan penyerap serta penurunan pH larutan hingga bersifat asam kuat. Kondisi ini memang meningkatkan kemampuan penyerapan gas asam seperti CO<sub>2</sub>, tetapi juga menimbulkan risiko korosi pada peralatan. Selain itu, konsumsi air relatif tinggi, sehingga perlu strategi daur ulang agar penggunaan sumber daya lebih efisien. Hambatan lain adalah kebutuhan energi untuk menjaga tekanan semprot dan sirkulasi, yang dapat meningkatkan biaya operasional apabila tidak dikelola dengan baik.

Untuk mengatasi hambatan tersebut, diperlukan langkah-langkah perbaikan operasional. Pengendalian pH menjadi aspek penting, misalnya dengan menambahkan sistem monitoring *real-time* serta pemberian larutan buffer atau basa ringan untuk menjaga pH tetap stabil dalam kisaran optimal.

Penerapan multi-stage scrubber dapat meningkatkan efisiensi penyisihan polutan dengan cara memperpanjang lintasan kontak gas-cair. Selain itu, pemanfaatan bahan kimia penyerap tertentu (misalnya larutan alkali NaOH atau Ca(OH)<sub>2</sub>) dapat meningkatkan kemampuan penyerapan gas asam, sekaligus menurunkan risiko korosi akibat pH yang terlalu rendah. Sistem daur ulang air dengan unit netralisasi juga direkomendasikan untuk menekan konsumsi air dan mengurangi limbah cair.

Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada pengembangan integrasi *wet scrubber* dengan teknologi pengendali emisi lainnya, seperti filter partikulat atau biofilter, untuk memperluas cakupan polutan yang dapat ditangani. Selain itu, evaluasi efisiensi energi dari sistem scrubbing perlu dilakukan untuk merumuskan desain yang lebih hemat daya. Penggunaan sensor IoT untuk pemantauan emisi secara *real-time* juga menjadi peluang penelitian yang relevan, sehingga sistem scrubber dapat dikendalikan secara otomatis sesuai variasi beban gas buang. Kajian lebih lanjut mengenai pemanfaatan limbah cair hasil scrubbing, misalnya melalui proses netralisasi atau reuse untuk kebutuhan lain, juga penting untuk mendukung keberlanjutan operasional insinerator secara keseluruhan.

#### IV. KESIMPULAN

Sistem wet scrubber terbukti efektif dalam menurunkan konsentrasi gas berbahaya dari proses insinerasi sampah, di mana CO yang awalnya mencapai 500 ppm berhasil turun di bawah ambang batas aman (<70 ppm) pada sirkulasi ketiga, sementara CO<sub>2</sub> menurun secara stabil di bawah 5000 ppm. pH air sirkulasi juga berperan penting dalam efisiensi penghilangan gas; penurunan pH dari 6,9 menjadi 3–4 meningkatkan kelarutan CO<sub>2</sub>, namun tetap perlu pengawasan untuk mencegah korosi peralatan. Dengan protokol pengoperasian yang mencakup pemantauan rutin gas dan pH, penggantian atau penambahan air serta buffer, serta pemeliharaan filter secara berkala, kinerja scrubber dapat terjaga secara optimal. Penerapan sistem ini mendukung operasional insinerator yang aman, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, sekaligus meminimalkan risiko terhadap kesehatan operator.

#### REFERENSI

- [1] G. Gunawan, S. Supardin, R. Ruhana, and N. Juhan, "Implementasi Insinerator untuk Pengolahan Sampah di Desa Alue Lim Lhokseumawe," *J. Vokasi*, vol. 9, no. 1, p. 76, 2025, doi: 10.30811/vokasi.v9i1.6527.
- [2] S. R. Damayanti and N. Hendrasarie, "Efektivitas Absorben Kimia pada Wet Scrubber untuk Menurunkan Emisi CO dan CO<sub>2</sub>," *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 117887–11795, 2025.
- [3] H. Jayadi, F. Hendrarinata, B. Suyanto, and S. Sunaryo, "Chimney Filter Model Wet Scrubber to Reduce Air Pollutant Emissions on the Incinerator," *Heal. Notions*, vol. 5, no. 2, pp. 41–45, 2021, doi: 10.33846/hn50201.
- [4] B. A. Danzomo, S. A. Umar, and M. J. E. Salami, "Wet Scrubber Design," in *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 371, M. Mariappan, R. Akmeliawati, M. R. Arshad, and C. S. Chong, Eds., Malaysia: Springer Nature Switzerland AG 2022, pp. 257–266. doi: 10.1007/978-3-030-74540-0\_11.

- [5] W. N. R. A. Budiman, "Percanaan Emisi PM 10 pada Industri Peleburan Baja Cilegon - Banten," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [6] G. Gunawan, S. Supardin, I. Idwar, R. Rahmawati, and A. Mardiyanto, "Analisis Kinerja Insinerator Menggunakan Sistem Monitoring Suhu dan Gas Buang," *J. Teknol.*, vol. 25, no. 1, p. 65, 2025, doi: 10.30811/teknologi.v25i1.6662.
- [7] I. R. J. Sari *et al.*, "Wet Scrubber Performance Optimization Application Assisted With Electrochemical-Based Ammonia Sensors," *J. Ris. Teknol. Pencegah. Pencemaran Ind.*, vol. 10, no. 2, pp. 36–42, 2019, doi: 10.21771/jrtppi.2019.v10.no2.p36-42.
- [8] K. H. Javed, T. Mahmud, and E. Purba, "The CO2 capture performance of a high-intensity vortex spray scrubber," *Chem. Eng. J.*, vol. 162, no. 2, pp. 448–456, 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.03.038.
- [9] R. Krzyzynska and N. D. Hutson, "Effect of solution pH on SO2, NOx, and Hg removal from simulated coal combustion flue gas in an oxidant-enhanced wet scrubber," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 62, no. 2, pp. 212–220, 2012, doi: 10.1080/10473289.2011.642951.
- [10] H. H. Ndiritu, K. Karanja, and B. B. Gathitu, "Effect of Cooling Rate Heat Dioxide Treatment the Absorption of Flue Gas and Carbon in on a Wet Microstructure Impact Resistance Recycled Scrubber using and Sodium and Calcium of Hydroxide Aluminium Sand Cast Alloy . Solvents," *J. Sustain. Res. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–23, 2014.
- [11] A. Maddeppungeng, S. Asyiah, D. E. Intari, M. A. Putro, and D. N. Setiawati, "Occupational Health and Safety (K3) Risk Management Analysis on Building Construction Projects in Indonesia: Literature Review," *Fondasi J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 2, p. 260, 2023, doi: 10.36055/fondasi.v12i2.21986.