

Optimasi Vortex Wet Scrubber dengan Suspensi Dolomit untuk Penangkapan Partikel Karbon Ultrafine dan Polutan Asam yang Lebih Efisien

Optimization of Vortex Wet Scrubber with Dolomite Suspension for More Efficient Capture of Ultrafine Carbon Particles and Acid Pollutants

Gunawan¹, Bambang Sugiantoro², Ngisomudin^{3*}, Warso⁴, Nana Supriyana⁵

^{1,2}Program Studi S1 Teknik Mesin STT Wiworotomo Purwokerto

^{3,4,5}Program Studi D3 Teknik Mesin STT Wiworotomo Purwokerto

*Coressponding Author Email: ngisomudin@stt-wiworotomo.ac.id

Abstrak

Pencemaran udara akibat emisi partikulat dari pembakaran sampah menjadi tantangan lingkungan yang signifikan. Penelitian ini mengembangkan sistem *Vortex Wet Scrubber* (VWS) berbasis larutan air dan dolomit untuk meningkatkan efisiensi pengendalian emisi gas dan partikulat halus. Uji eksperimental menunjukkan bahwa sistem ini mampu mengurangi PM10 hingga 95–98%, PM2.5 hingga 90–95%, dan PM1.0 hingga 75–85%, dengan efisiensi absorpsi gas mencapai 98% untuk SO₂ dan 90% untuk NO_x pada kelarutan dolomit 20% (pH 9.5–10.0). Namun, 5–15% partikel karbon ringan (<1 μm) masih lolos, disebabkan oleh hidrofobisitas partikel, waktu kontak yang terbatas, dan ukuran partikel yang sangat kecil. Optimasi dilakukan melalui peningkatan turbulensi, penggunaan surfaktan, dan penambahan koagulan untuk meningkatkan penyerapan karbon ringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini lebih hemat energi dibandingkan Venturi Scrubber, dengan konsumsi daya yang lebih rendah. Kombinasi teknologi VWS dengan elektrostatis atau penyemprotan ultra-halus berpotensi meningkatkan efisiensi lebih lanjut. Studi ini menawarkan solusi inovatif dalam teknologi pengendalian emisi yang ramah lingkungan, serta menjadi dasar pengembangan sistem pencucian asap yang lebih efektif untuk aplikasi industri dan perkotaan.

Kata kunci: Vortex Wet Scrubber, Dolomit, Reduksi Emisi, Partikulat Karbon, Efisiensi, Absorpsi.

Abstract

Air pollution caused by particulate emissions from waste incineration poses a significant environmental challenge. This study develops a Vortex Wet Scrubber utilizing a water-dolomite solution to enhance the efficiency of gas and fine particulate emission control. Experimental results demonstrate that the system effectively reduces PM10 by 95–98%, PM2.5 by 90–95%, and PM1.0 by 75–85%, while achieving 98% absorption efficiency for SO₂ and 90% for NO_x at a dolomite solubility level of 20% (pH 9.5–10.0). However, 5–15% of ultrafine carbon particles (<1 μm) remain unfiltered, attributed to their hydrophobic nature, limited gas-liquid contact time, and submicron size. Optimization strategies include turbulence enhancement, surfactant addition, and coagulant integration to improve carbon particle absorption. The findings reveal that this system is more energy-efficient than the Venturi Scrubber, operating at a lower power consumption. Additionally, integrating Vortex Wet Scrubber technology with electrostatic precipitation or ultra-fine mist injection could further enhance efficiency. This study offers an innovative, environmentally friendly emission control solution and provides a foundation for developing more effective gas scrubbing systems for industrial and urban applications.

Keywords: *Vortex Wet Scrubber, dolomite, emission reduction, carbon particulates, absorption.*

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pencemaran udara akibat emisi partikulat dari proses industri dan pembakaran sampah menjadi permasalahan lingkungan yang krusial karena berdampak langsung terhadap kesehatan manusia serta ekosistem. Proses pembakaran sampah yang tidak terkontrol menghasilkan asap yang mengandung berbagai polutan berbahaya, termasuk partikulat halus (PM), gas beracun seperti sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), serta senyawa organik volatil (VOCs) (Wang et al., 2022). Paparan jangka panjang terhadap polutan ini telah dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan gangguan kesehatan lainnya [1-2]. Selain itu, emisi dari pembakaran sampah juga berkontribusi terhadap degradasi kualitas udara dan perubahan iklim melalui peningkatan konsentrasi gas rumah kaca serta terbentuknya hujan asam, untuk mengatasi dampak negatif pencemaran udara, berbagai metode pengendalian emisi telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan *wet scrubber* sebagai sistem pengendali polutan berbasis cairan. Venturi *scrubber*, sebagai salah satu jenis *wet scrubber*, telah terbukti efektif dalam menangkap partikulat halus dan gas berbahaya dengan memanfaatkan energi dari aliran gas berkecepatan tinggi untuk mengatomisasi cairan pencuci, [3-4]. Teknologi ini meningkatkan luas kontak antara gas dan cairan, sehingga meningkatkan efisiensi absorpsi polutan. Namun, optimalisasi sistem pencuci asap masih menjadi tantangan, terutama dalam hal efisiensi penyerapan gas asam tanpa meningkatkan konsumsi energi yang berlebihan, [5].

Dalam penelitian ini, larutan alkali berbasis dolomit (CaMg(CO₃)₂) digunakan sebagai media absorpsi dalam venturi scrubber untuk meningkatkan efektivitas penangkapan partikulat dan menetralkan gas asam. Dolomit memiliki sifat buffering yang tinggi serta mampu bereaksi dengan polutan asam seperti SO₂, NO_x, dan HCl, membentuk senyawa netral yang lebih aman bagi lingkungan, [6]. Selain itu, reaktivitas dolomit yang lebih stabil dibandingkan kapur konvensional memungkinkan penyerapan gas asam yang lebih optimal, mengurangi risiko pencemaran sekunder, serta menurunkan konsumsi bahan kimia tambahan dalam proses pengendalian emisi. [7]. Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengembangkan sistem venturi scrubber berbasis dolomit tanpa sirkulasi fluida berkelanjutan, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi absorpsi emisi, tetapi juga mengurangi konsumsi energi dalam operasionalnya. Berkontribusi dalam mengembangkan solusi berkelanjutan untuk pengendalian emisi pembakaran sampah dan industri, sekaligus memperkuat pendekatan ramah lingkungan dalam mitigasi pencemaran udara.

1.2. Tujuan Penggunaan Wet Scrubber dalam Pencucian Asap Pembakaran Sampah

Tujuan utama penggunaan wet scrubber dalam konteks pembakaran sampah adalah untuk mengurangi emisi polutan yang dilepaskan ke atmosfer. Dengan demikian, wet scrubber berperan penting dalam:

- a. Mengurangi Konsentrasi Partikulat: Pembakaran sampah menghasilkan partikulat halus yang dapat terhirup dan menyebabkan masalah kesehatan serius. Wet scrubber efektif dalam menangkap dan menghilangkan partikulat ini dari aliran gas buang.
- b. Menghilangkan Gas Berbahaya: Selain partikulat, pembakaran sampah juga menghasilkan gas berbahaya seperti SO₂ dan NO_x. Wet scrubber dapat mengabsorpsi gas-gas ini, sehingga mengurangi dampak negatifnya terhadap kesehatan dan lingkungan.
- c. Meningkatkan Kualitas Udara: Dengan mengurangi emisi polutan, *wet scrubber* membantu meningkatkan kualitas udara di sekitar fasilitas pembakaran sampah, yang pada gilirannya melindungi kesehatan masyarakat dan ekosistem lokal.
- d. Memenuhi Standar Emisi: Banyak negara memiliki peraturan ketat mengenai emisi dari fasilitas pembakaran sampah. Penggunaan wet scrubber membantu operator fasilitas memenuhi standar ini, menghindari sanksi, dan berkontribusi pada upaya global untuk mengurangi pencemaran udara.

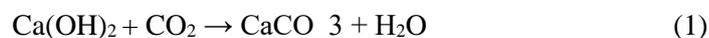
1.3. Efektivitas *Wet Scrubber* dalam Pengendalian Emisi Pembakaran Sampah

Beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas *wet scrubber* dalam mengendalikan emisi dari pembakaran sampah, penggunaan *wet scrubber* lebih efisien daripada *cyclone* dalam mengurangi kadar debu dan kepekatan asap pada sumber emisi tidak bergerak. Selain itu, dapat mengurangi konsentrasi SO_2 dan NO_x secara signifikan dalam gas buang dari proses pembakaran, yang berdampak pada Kesehatan, [8-11]. Penggunaan karena mampu menghilangkan berbagai jenis polutan, termasuk partikulat halus dan gas larut air, dengan efisiensi tinggi. (2). Fleksibilitas/Dapat digunakan untuk berbagai jenis proses pembakaran dan jenis polutan. (3). Pendinginan Gas Buang/ Selain menghilangkan polutan, *wet scrubber* juga mendinginkan gas buang, yang dapat bermanfaat dalam beberapa aplikasi industri.

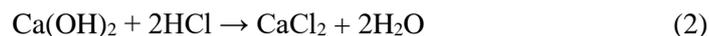
Mesin pencuci asap dengan larutan alkali yang diajukan memiliki keunggulan dan spesifikasi teknik sebagai berikut ; (1). Pembentukan turbulensi cairan pencuci melalui perubahan penampang dan kontruksi celah sempit dengan bilah fleksibel berpegas untuk optimalisasi spray dan pengikatan partikel dan unsur kimia seperti CO, HC dan H_2S , (2). Mekanisme pencucian asap dilakukan dengan memanfaatkan tekanan gas pembakaran, tidak memerlukan sirkulasi spray dengan pompa secara kontinu, operasional mudah, biaya energi listrik rendah, (3). Larutan alkali dibuat dengan air dan kapur yang murah dan berfungsi ganda untuk penjernihan larutan, mampu digunakan dalam jangka panjang, dengan suplay manual. (4). Mampu mereduksi jelaga 98,7%, menetralkan kadar asam basa, aman bagi operator dan lingkungan. Potensi komersil didasarkan pada pertimbangan teknis dan performasi yang tinggi untuk mereduksi polutan dan mampu menghasilkan filtrasi dengan output mutu udara yang sesuai dengan regulasi mutu udara, filtrasi sesuai limitasi partikulat PM 5 kurang dari $65 \mu\text{gram}/\text{m}^3$, asap tidak berwarna, dan tidak berbau. Pencucian tanpa sirkulasi pompa kontinu akan mereduksi biaya energi Listrik, [12].

1.4. Tantangan Inovasi *wet scrubber*

Namun, ada beberapa tantangan yang perlu dipertimbangkan yaitu Pengelolaan Limbah Cair: Cairan pencuci yang terkontaminasi harus dikelola dengan baik untuk mencegah pencemaran lingkungan. Konsumsi Air: *Wet scrubber* memerlukan jumlah air yang signifikan, yang dapat menjadi masalah di daerah dengan keterbatasan sumber daya air. Korosi: Komponen *wet scrubber* rentan terhadap korosi akibat kontak dengan gas asam dan cairan pencuci, sehingga memerlukan material tahan korosi dan perawatan rutin. Seiring dengan perkembangan teknologi, desain dan efisiensi *wet scrubber* terus ditingkatkan. Beberapa inovasi meliputi penggunaan material baru yang lebih Untuk mengatasi masalah ini, berbagai metode pengendalian emisi telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan *wet scrubber*. *Wet scrubber* adalah perangkat yang menggunakan cairan untuk menghilangkan polutan dari aliran gas. [12]. Dalam konteks pengolahan asap pembakaran sampah, *wet scrubber* berfungsi mencuci asap dengan cairan untuk menghilangkan partikulat dan gas terlarut, sehingga asap yang dilepaskan ke atmosfer lebih bersih dan aman. Larutan kapur bersifat basa kuat, sehingga dapat bereaksi dengan gas asam dalam hasil pembakaran plastik, Reaksi dengan Karbon Dioksida (CO_2):



Reaksi ini menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3)* yang tidak larut dan dapat mengendap. Reaksi dengan Hidrogen Klorida (HCl):



Hasilnya adalah kalsium klorida (CaCl_2), yang larut dalam air dan lebih aman dibanding gas HCl. Netralisasi gas asam lainnya (SO_2 , NO_2), Larutan kapur juga dapat menyerap sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2), mengurangi dampak polutan.

1.5. Tujuan Penggunaan Pencuci Asap dalam Pembakaran Sampah 2 tingkat

Tujuan utama penggunaan pencuci asap (*wet scrubber*) dalam proses pembakaran sampah adalah :

- a. **Mengurangi Emisi Partikulat dan Gas Berbahaya:** Wet scrubber efektif dalam menangkap dan menghilangkan partikulat halus serta gas berbahaya dari asap hasil pembakaran, sehingga mengurangi pencemaran udara.
- b. **Meningkatkan Kualitas Udara:** Dengan mengurangi emisi polutan, wet scrubber berkontribusi pada peningkatan kualitas udara di sekitar fasilitas pembakaran sampah.
- c. **Melindungi Kesehatan Masyarakat:** Pengurangan polutan udara berbahaya membantu mencegah masalah kesehatan yang terkait dengan paparan polusi udara.
- d. **Dan Mematuhi Regulasi Lingkungan:** Penggunaan wet scrubber membantu fasilitas pengolahan sampah memenuhi standar emisi yang ditetapkan oleh otoritas lingkungan.

Kapur dolomit sebagai campuran air akan membantu menjernihkan larutan. Wet scrubber bekerja berdasarkan prinsip kontak antara aliran gas yang terkontaminasi dengan cairan pencuci, biasanya air atau larutan kimia tertentu. Dalam venturi scrubber, aliran gas dipercepat melalui sebuah venturi, menciptakan zona bertekanan rendah yang menyebabkan cairan pencuci teratomisasi menjadi tetesan kecil. Tetesan ini kemudian berinteraksi dengan partikulat dan gas berbahaya dalam aliran gas, menangkap dan mengabsorpsi polutan tersebut. Partikulat yang terperangkap dalam tetesan cairan kemudian dipisahkan dari aliran gas melalui proses pengendapan atau filtrasi, sementara gas yang telah dibersihkan dilepaskan ke atmosfer.

2.METODOLOGI:

4.2 Pembuatan wet scrubber

Mekanisme kerja kontak gas-cair, asap hasil pembakaran dialirkan melalui chamber di mana ia bersentuhan dengan cairan scrubbing. Kontak ini dapat ditingkatkan melalui penggunaan nozzle yang menyemprotkan cairan dalam bentuk tetesan halus, meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan cairan. Penangkapan Partikulat, Partikulat dalam asap ditangkap oleh tetesan cairan melalui mekanisme impaksi, difusi, dan pengendapan gravitasi. Partikulat yang tertangkap kemudian terbawa oleh cairan scrubbing.

Prinsip kerja alat ini adalah pencucian asap memanfaatkan tekanan gas tinggi yang dialirkan pada venturi yang dilengkapi plat berpegas dua level untuk membentuk spray/kabut dengan pusaran larutan alkali. Kontruksi mesin dengan penampang ganda mengalirkan asap melalui venturi 50 mm dengan plat berpegas. Pergerakan pelat akan menyebabkan gerak harmonik akibat dorongan larutan alkali membentuk pusaran dan pengabutan secara cepat/simultan. Vortex wet scrubber yang diajukan merupakan inovasi pencucian asap tanpa sirkulasi fluida. Plat berpegas berbahan stainless steel tebal 0.50 mm, lebar 40 mm dan panjang 150 mm, berjumlah 2 buah pada sisi atas dan bawah ujung venturi.

Kontruksi penampang ganda dengan masing-masing 2 buah plat diujung venturi maka total 4 buah plat fleksibel. Kontrol volume fluida alkali dengan memasang pipa pembuangan difungsikan untuk mengatur tinggi permukaan. Larutan yang digunakan adalah larutan basa (alkali) dengan pH 9, tingkat basa akan menyeimbangkan pH larutan. Larutan alkali menggunakan kapur dolomit akan mengikat unsur kimia agar netral pada pH 7 sekaligus berfungsi menjernihkan larutan. Gas-gas terlarut dalam asap, seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), diabsorpsi oleh cairan scrubbing. Efisiensi absorpsi bergantung pada sifat kimia cairan; misalnya, penambahan alkali dapat meningkatkan kapasitas absorpsi untuk gas asam. Pemurnian dan Pembuangan: Cairan scrubbing yang telah mengandung polutan kemudian dipisahkan dari aliran gas bersih. Gas yang telah dibersihkan dilepaskan ke atmosfer, sementara cairan yang terkontaminasi diproses lebih lanjut atau dibuang sesuai dengan regulasi lingkungan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. Tahapan Pembuatan mesin pencuci asap dan cyclone

3. Metode Uji efektifitas

3.1. Komposisi dan Karakteristik Larutan Pencuci (Air dan Dolomit)

- Fluida menggunakan Konsentrasi Dolomit dalam Air: 5–15% (w/w) untuk menjaga keseimbangan antara viskositas, efektivitas reaksi, dan konsumsi material.
- Kontrol pH Larutan: 8,5–10 untuk memastikan kemampuan optimal dalam menetralsir gas asam seperti SO_2 dan NO_x .

Mesin pencuci yang diaplikasikan merupakan tipe pencucian tanpa sirkulasi fluida kontinyu, proses pencucian asap terjadi dengan memanfaatkan tekanan gas pembakaran, dan tidak menggunakan

pompa untuk spray langsung. Uji performasi pencuci asap dikontrol dengan alat sensor mutu udara, diakhir proses dihasilkan asap yang bebas jelaga, dan kandungan ppm dibawah 1000 ppm, tanpa ditemukan unsur berbahaya dan bau. Reduksi partikel dan kandungan kimia berbahaya yang terkandung dalam asap pembakaran mencapai 99,8%. Alat yang dikembangkan terdiri dari penampang celah lebar 20 mm yang berfungsi mengalirkan asap melalui venturi panjang 80 mm, menciptakan pusaran untuk menangkap partikulat, Waktu Kontak Gas-Cair: 0,5–2 detik, melalui celah *scrubber*, untuk memastikan gas asam memiliki cukup waktu bereaksi dengan dolomit, [12-13] . Kontrol volume fluida alkali dilakukan dengan memasang pipa pembuangan untuk mengatur tinggi permukaan larutan. Larutan alkali yang digunakan adalah kapur dolomit dengan pH 9, yang mampu menetralkan unsur kimia hingga pH 7 dan berfungsi menjernihkan larutan. Prinsip kerja wet scrubber melibatkan kontak antara aliran gas yang terkontaminasi dengan cairan scrubbing (biasanya air) untuk menghilangkan polutan

4 Data Penelitian dan Pembahasan

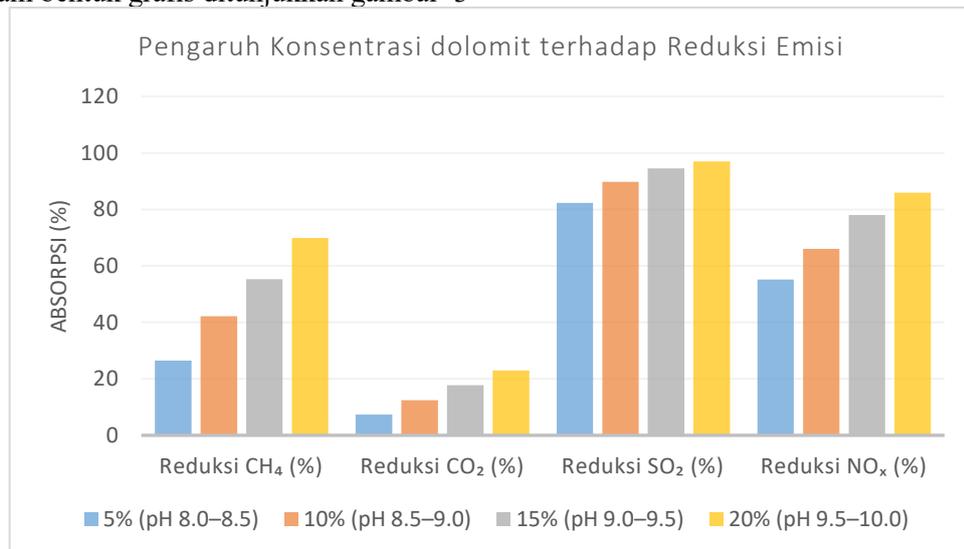
4.1 Data pengukuran emisi gas

Berikut adalah tabel reduksi emisi berbagai senyawa polutan (CH₄, CO₂, SO₂, dan NO_x) berdasarkan variasi level kelarutan kapur/dolomit dalam fluida pencuci pada sistem Vortex Wet Scrubber Hasil uji menghasilkan filtrasi sesuai limitasi partikulat PM 5 kurang dari 65 µgram/m³, asap tidak berwarna dan tidak berbau. Pencucian tanpa sirkulasi pompa kontinyu akan mereduksi biaya energi listrik.. Data ditunjukkan tabel 1.

Tabel 1. Data rata-rata pengukuran reduksi emisi melalui absorpsi fluida

Kelarutan Kapur/Dolomit	Reduksi CH ₄ (%)	Reduksi CO ₂ (%)	Reduksi SO ₂ (%)	Reduksi NO _x (%)
5% (pH 8.0–8.5)	26,5	7,4	82,3	55,2
10% (pH 8.5–9.0)	42,2	12,5	89,8	66
15% (pH 9.0–9.5)	55,3	17,8	94,5	78
20% (pH 9.5–10.0)	69,9	23	97	86

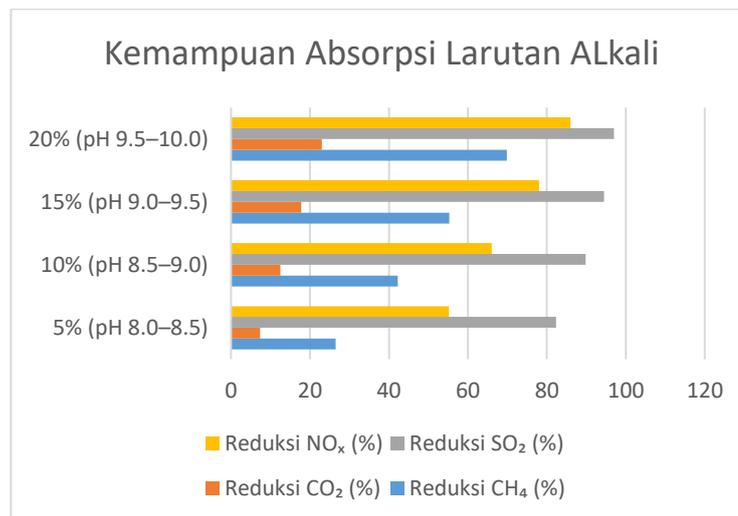
Dalam bentuk grafis ditunjukkan gambar 3



Gambar 3. Grafik kemampuan absorpsi emisi gas larutan basa

Mengacu hasil pengukuran diketahui Reduksi CH₄ (Metana) Peningkatan kelarutan dolomit meningkatkan penyerapan metana, karena dolomit membantu mengadsorpsi hidrokarbon ringan dalam gas buang. Efek reduksi CO₂ lebih rendah dibandingkan SO₂ dan NO_x, karena CO₂ merupakan gas inert yang tidak bereaksi langsung dengan larutan alkali. Namun, adsorpsi pada

larutan alkali dengan dolomit dapat mengikat sebagian CO₂ sebagai bikarbonat. Reaksi SO₂ dengan dolomit (CaMg(CO₃)₂) menghasilkan CaSO₄ dan MgSO₄, yang sangat efektif dalam menyerap SO₂. Pada pH ≥9.5, efisiensi absorpsi bisa mencapai 95–98%. NO_x lebih sulit ditangkap dibanding SO₂, tetapi peningkatan pH membantu mengoksidasi NO menjadi NO₂, yang lebih larut dalam air. Efisiensi bisa mencapai 86% pada kelarutan dolomit 20%. Dari tabel ini, optimalisasi kelarutan dolomit pada 15–20% (pH 9–10) memberikan keseimbangan terbaik antara reduksi SO₂ dan NO_x dengan konsumsi energi yang masih efisien.



Gambar 4. Kemampuan absorpsi pada masing-masing level basa

4.2 Absorpsi Partikel pada Berbagai Level Kelarutan Dolomit dalam Fluida Pencuci

Efisiensi penangkapan partikulat pada berbagai level kelarutan dolomit dalam sistem Vortex Wet Scrubber, dengan fokus pada partikel halus seperti karbon ringan (*fine carbon particles*), yang masih dapat lolos meskipun sudah melalui proses pencucian asap. Persentase penyerapan partikel ditunjukkan tabel 2.

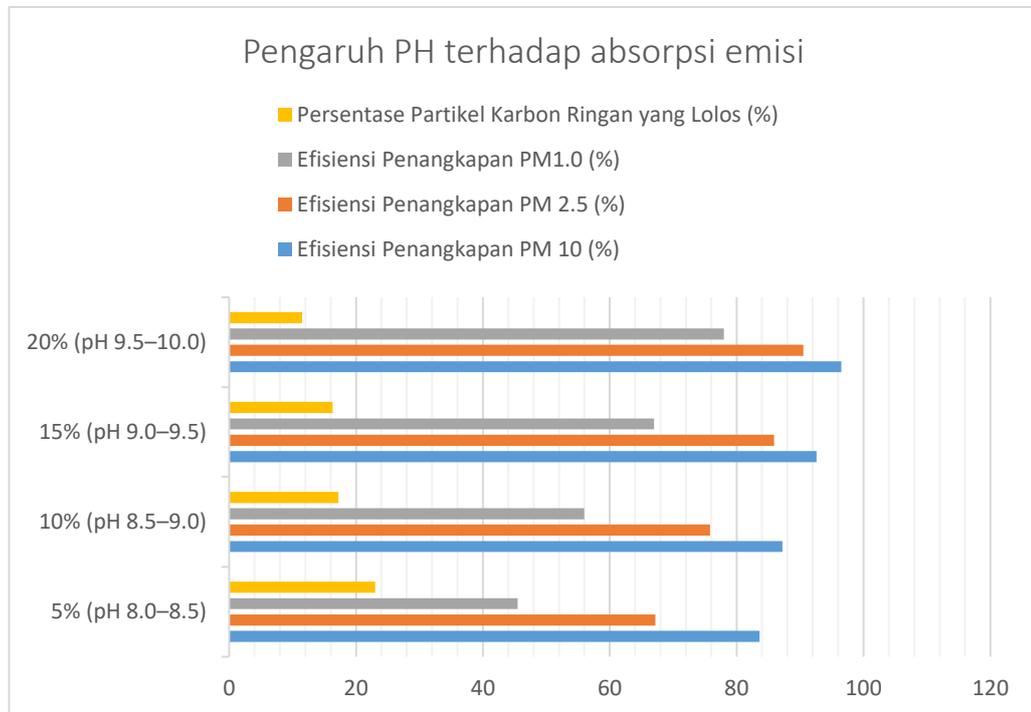
Tabel 2. Hasil pengujian efektifitas absorpsi pencuci asap

Kelarutan Dolomit dalam Fluida	Efisiensi Penangkapan PM 10 (%)	Efisiensi Penangkapan PM 2.5 (%)	Efisiensi Penangkapan PM1.0 (%)	Persentase Partikel Karbon Ringan yang Lolos (%)
5% (pH 8.0–8.5)	83,6	67,2	45,5	23
10% (pH 8.5–9.0)	87,2	75,80	56	17,25
15% (pH 9.0–9.5)	92,6	85,90	67	16,30
20% (pH 9.5–10.0)	96,5	90,5	78	11,5

4.3 Metode Absorpsi Partikel Ringan Karbon

Kemampuan absorpsi partikel sistem *Vortex Wet Scrubber* dengan fluida air dan dolomit memiliki efisiensi tinggi dalam menangkap partikulat kasar hingga halus (PM10 hingga PM2.5), beberapa partikel karbon ringan (PM1.0 dan lebih kecil) masih dapat lolos. Penyebab utama fenomena Ukuran Partikel yang Sangat Kecil (<1 μm), Partikel karbon ringan memiliki massa yang sangat kecil, sehingga tidak mudah tertangkap oleh gaya gravitasi atau impaksi dalam scrubber. Efisiensi scrubber dalam menangkap partikel halus sangat bergantung pada mekanisme difusi Brownian, yang lebih efektif untuk ukuran partikel di bawah 100 nm tetapi kurang optimal untuk partikel dalam rentang 300–1000 nm. Kedua Hidrofobisitas Partikel Karbon, Partikel karbon ringan umumnya hidrofobik, sehingga memiliki afinitas rendah terhadap air. Ini menyebabkan partikel tidak mudah terperangkap dalam larutan pencuci, berbeda dengan partikel yang bersifat

lebih hidrofilik seperti debu silika atau sulfat. Pengaruh PH larutan terhadap absorpsi partikel ditunjukkan gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh PH larutan terhadap absorpsi partikel

Kecepatan Aliran Gas dan Waktu Kontak yang Terbatas akibat proses Vortex Wet Scrubber, waktu kontak gas-cair biasanya relatif singkat (0,5–2 detik), yang mungkin belum cukup untuk menangkap seluruh partikel ringan. Peningkatan turbulensi memang dapat membantu, tetapi jika aliran gas terlalu cepat, partikel karbon yang sangat kecil bisa tetap lolos bersama aliran gas yang telah dicuci. Kurangnya Koagulan atau Agen Pembasah dalam Larutan Pencuci Larutan air dan dolomit memiliki sifat alkali, tetapi tidak secara langsung meningkatkan *wettability* partikel karbon. Penggunaan aditif seperti surfaktan atau elektrolit dapat membantu meningkatkan daya ikat partikel karbon dengan larutan pencuci. Untuk meningkatkan efisiensi penangkapan partikel karbon ringan, beberapa langkah dapat dilakukan dengan menggunakan Nozzle Atomisasi Ultra-Halus, Penyemprotan cairan pencuci dengan droplet ukuran $<50 \mu\text{m}$ dapat meningkatkan luas kontak antara cairan dan partikel karbon. Kedua dengan menambahkan Surfaktan atau Koagulan Surfaktan dapat menurunkan tegangan permukaan air, meningkatkan daya lekatnya terhadap partikel karbon. Koagulan (seperti FeCl_3 atau polimer kationik) dapat membantu menggumpalkan partikel halus, sehingga lebih mudah ditangkap. Meningkatkan Waktu Kontak Gas-Cair, Memperpanjang jalur aliran gas dalam **scrubber** atau menambahkan tahap pencucian kedua dapat meningkatkan peluang penangkapan partikel karbon ringan.

4.4. Pembahasan

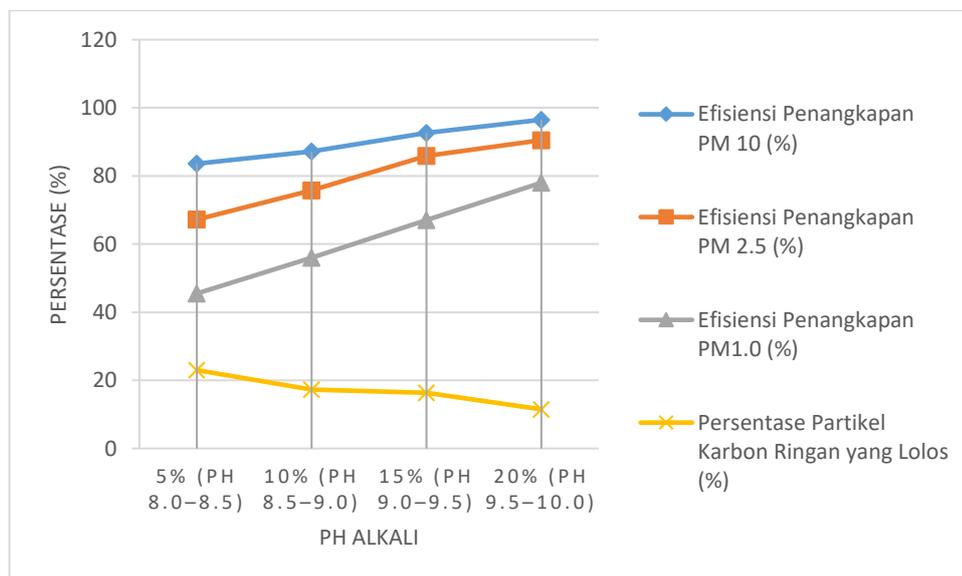
Mesin ini berdasarkan ujicoba pada 3 jenis pembakaran sampah mampu memenuhi tuntutan syarat mutu gas yang dibatasi kadar polutan, diantaranya adalah, (1). Mesin berfungsi mengikat unsur dan partikel yang bersifat asam melalui larutan basa dg pH 9, proses pembentukan endapan akan bersifat netral pada pH 7. (2). Pencucian asap dengan mengalirkan asap yang bertekanan untuk menekan larutan basa (air dan alkali) mendorong ke venturi dua tingkat akan menurunkan suhu secara cepat dibawah 40°C , (3). Kontruksi vortex wet Scrubber dibuat dua aliran penempang pencucian dengan tujuan agar tekanan gas mampu membentuk turbulensi, efek tekanan

gas pasa venturi akan menyebabkan plat berpegas bergetar harmonik dan menciptakan spray/kabut dan percikan, (4). Proses pencucian dengan pembentukan turbulensi dilakukan 2 tingkat untuk reduksi lebih optimal partikel jelaga dan meningkatkan reaksi pengikatan SO₂ dan CO pada larutan alkali. Optimasi reaksi kimia dengan dolomit diketahui dari kemampuan menetralkan kadar SO₂ dan NO_x, Reaksi Netralisasi SO₂ dan NO_x adalah :



Penggunaan dolomit untuk meningkatkan efisiensi reaksi dan mencegah pelepasan gas asam residual. Pada aspek lainnya adalah dengan metode ini, Efisiensi Pengurangan Partikulat (PM) dan Gas Asam ditingkatkan dengan kemampuan mengabsorpsi Partikulat PM_{2.5} dan PM₁₀: Target reduksi >90% dengan desain scrubber yang mampu menangkap partikel berukuran mikro. Sulfur Dioksida (SO₂): Efisiensi absorpsi >95% dengan rasio molar dolomit terhadap SO₂ minimal 2:1. Dan Nitrogen Oksida (NO_x): 50–80%, dapat ditingkatkan dengan kombinasi dolomit dan aditif katalitik, [13-16].

Berbagai metode pencucian asap (wet scrubber) telah dikembangkan untuk mengurangi emisi partikulat dan gas berbahaya dari proses industri dan pembakaran sampah. Dua metode yang sering digunakan adalah VWS dengan fluida berbasis air dan dolomit serta teknologi scrubber konvensional seperti *Venturi Scrubber*, *Packed Bed Scrubber*, dan *Spray Tower Scrubber*, [17-18]. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan dalam hal efisiensi penangkapan partikulat, pengurangan gas asam, konsumsi energi, dan biaya operasional.. VWS merupakan sistem yang memanfaatkan gaya sentrifugal untuk meningkatkan turbulensi dan memperpanjang waktu kontak antara gas buang dan larutan pencuci. Dengan menggunakan campuran air dan dolomit sebagai fluida, sistem ini menunjukkan efisiensi tinggi dalam mengurangi gas asam seperti SO₂ dan NO_x karena sifat alkalinitas dolomit yang lebih stabil dibandingkan kapur konvensional [19,20]



Gambar 6. Efektifitas absorpsi PH larutan terhadap partikel

Data diatas menunjukkan berkurangnya konsentrasi partikulat PM_{2.5} hingga 90% dan SO₂ hingga 95% dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan *Venturi Scrubber*.. *Venturi Scrubber* bekerja dengan memanfaatkan aliran gas berkecepatan tinggi untuk mengatomisasi cairan pencuci, meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan cairan.. Metode ini sangat efektif dalam menangkap partikulat berukuran mikro, tetapi memiliki kelemahan dalam hal konsumsi energi yang tinggi akibat tekanan diferensial yang diperlukan untuk mencapai efisiensi optimal. Dibandingkan dengan VWS berbasis dolomit, *Venturi. Packed Bed Scrubber* menggunakan media padat berpori yang memungkinkan aliran gas dan cairan berinteraksi dengan efisiensi tinggi.

Emisi rendah akan mencegah paparan polusi gas pada Kesehatan dan lingkungan, dengan reduksi kadar berbahaya yang bagi reproduksi, paru paru dan dampak lainnya proses pembakaran sampah, [8-11], Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya dalam menangkap gas asam dengan efisiensi hingga 99%, terutama jika menggunakan larutan alkali seperti natrium hidroksida (NaOH). Namun, kelemahannya adalah tingginya kebutuhan perawatan akibat potensi penyumbatan media dan konsumsi air yang lebih tinggi dibandingkan metode berbasis dolomit. Lebih efektif dibandingkan Metode *Spray Tower Scrubber* menggunakan nozzle penyemprot untuk menyebarkan larutan pencuci ke dalam aliran gas. Meskipun metode ini lebih sederhana dalam desain dan lebih hemat energi dibandingkan Venturi Scrubber, efisiensi penyerapan gas asamnya lebih rendah, dengan reduksi SO₂ hanya sekitar 70–85%. Efisiensi metode ini dapat ditingkatkan dengan penambahan dolomit, tetapi masih kalah dibandingkan dengan sistem VWS dalam menangani partikulat halus.

5. Kesimpulan Dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perbandingan di atas, Vortex Wet Scrubber dengan fluida air dandolomit menawarkan keseimbangan terbaik antara efisiensi pengurangan emisi dan konsumsi energi. Teknologi ini mampu menangani baik partikulat halus maupun gas asam dengan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan Venturi Scrubber dan Packed Bed Scrubber. Selain itu, dolomit sebagai media absorpsi memberikan keuntungan dalam stabilitas reaksi dan pengelolaan limbah, menjadikannya solusi yang lebih berkelanjutan.

5.2. Saran

- Perlunya penggunaan dolomit yang telah dikalsinasi (CaMgO₂) dapat meningkatkan reaktivitasnya dalam menetralkan gas asam seperti SO₂ dan NO_x. Proses kalsinasi meningkatkan luas permukaan spesifik, mempercepat reaksi dengan gas asam.
- Mengombinasikan dolomit dengan nanopartikel katalitik (misalnya Fe₂O₃, TiO₂, atau MnO₂) dapat meningkatkan efektivitas dalam mengoksidasi NO_x menjadi senyawa yang lebih mudah diserap oleh larutan pencuci.

Penggunaan Aditif Organik atau Polimer, dengan menambahkan surfaktan alami atau polimer hidrofilik dapat meningkatkan distribusi dolomit dalam larutan dan memperpanjang waktu kontak dengan gas buang

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nelson, M., et al. (2020). *Venturi Scrubber sebagai Alat Pengendalian Partikulat di Industri Kertas*. Repository ITS. <https://repository.its.ac.id/83416>.
- [2] Sukmana, I. (2019). *Evaluasi Kinerja Pengendalian Polutan dengan Sistem Wet Scrubber di Fasilitas Daur Ulang Limbah Padat*. <https://www.researchgate.net/publication/343985080>.
- [3] Astuti, A., et al. (2021). *Pengendalian Polutan Gas dan Partikulat Menggunakan Wet Scrubber: Studi Kasus di Pabrik Kertas*. <https://dspace.uji.ac.id/handle/123456789/49750>.
- [4] Latifah, S., et al. (2018). *Studi Eksperimental Wet Scrubber Berbasis Venturi untuk Reduksi SO₂ dan NO_x pada Proses Pembakaran Sampah*. Neliti. Diakses dari <https://media.neliti.com/media/publications/71931-ID-venturi-packed-scrubber-sebagai-pengenda.pdf>.
- [5] Rahmawati, N., et al. (2020). *Modifikasi Cerobong Wet Scrubber untuk Menurunkan Kadar Debu dan Kepekatan Asap pada Sumber Emisi Tidak Bergerak*. <https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=2987657>.
- [6] Bijay Kumar Das, Hiba Gul, (2023), *The Impacts of Air Pollution on Human Health and Well-Being: A Comprehensive Review*, Journal of Environmental Impact and Management Policy, October 2023. DOI: [10.55529/jeimp.36.1.11](https://doi.org/10.55529/jeimp.36.1.11)

- [7] Gajalakshmi Gajendran, et.al, (2024), *Contamination Of The Environment: Causes And Effects Of Air Pollution -A Review*, Community practitioner: the journal of the Community Practitioners' & Health Visitors' Association, 21(6). DOI: [10.5281/zenodo.12160393](https://doi.org/10.5281/zenodo.12160393)
- [8] Sah, R.D., Sharma, T. (2024). Quantitatively Evaluating Air Pollution Exposures to Determine Whether Reproductive Factors or Critical Growth Stages are Affected. In: Mishra, D., Yang, X.S., Unal, A., Jat, D.S. (eds) *Data Science and Big Data Analytics. IDBA 2023. Data-Intensive Research*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9179-2_19
- [9] Akkanur Cakir, Kabake Nazim, (2020), *Solid, Liquid and Gas Waste Management includes Handling of Impacts*, Journal Siplieria Sciences, December 2020, 1(2):20-24, DOI: [10.48173/jss.v1i2.60](https://doi.org/10.48173/jss.v1i2.60)
- [10] Tait, P. W. et al. (2019). *The health impacts of waste incineration: a systematic review*; Australian and New Zealand Journal of Public Health;
- [11] National Research Council (2000). *Waste Incineration and Public Health*;
- [12] The New School Tishman Environment and Design Center (2019). *U.S. Solid Waste Incinerators: An Industry in Decline*; Center for International Environmental Law (2019). *Plastic & Health: The Hidden Costs of Plastic Planet*.
- [13] Antoine Beylot, et.al, (2018), *Municipal Solid Waste Incineration in France: An Overview of Air Pollution Control Techniques*, J. Emissions, and Energy Efficiency, Volume22, Issue5, <https://doi.org/10.1111/jieec.12701>
- [14] Sharifah Aishah Syed Abd Kadir, (2013), Incineration of municipal solid waste in Malaysia: Salient issues, policies and waste-to-energy initiatives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 24, p 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.041>
- [15] Bo Leckner, et.al, (2015), Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units, *Waste Management*, Volume 37, March 2015, Pages 13-25, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.019>
- [16] Stone V, Miller MR, Clift MJD, Elder A, Mills NL, Møller P, et al. *Nanomaterials versus ambient ultrafine particles: an opportunity to exchange toxicology knowledge*. *Environ Health Perspect*. 2017;125(1–17).
- [17] Eleonora Sočo, et.al, (2023), *Characteristics of Adsorption/Desorption Process on Dolomite Adsorbent in the Copper(II) Removal from Aqueous Solutions*, June 2023, *Materials*, 16(13):4648. DOI: [10.3390/ma16134648](https://doi.org/10.3390/ma16134648)
- [18] Eleonora Sočo, et.al, (2021), *Characterization of the Physical, Chemical, and Adsorption Properties of Coal-Fly-Ash–Hydroxyapatite Composites*, July 2021, *Minerals*, 11(7):774. DOI: [10.3390/min11070774](https://doi.org/10.3390/min11070774)
- [19] A.K. Gupta, et.al, (2016), *Advances in sulfur chemistry for treatment of acid gases*, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 54, May 2016, Pages 65-92. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.11.001>
- [20] Azham Umar Abidin, et.al, (2025), *Environmental health risks and impacts of PM2.5 exposure on human health in residential areas, Bantul, Yogyakarta, Indonesia*, *Toxicology Reports*, Volume 14, June 2025, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.101949>