

# Tinjauan Efisiensi Pengendalian Debu dengan *Dry Fog System* di Industri Pengolahan Bijih Mineral

Arif Susanto<sup>1,2</sup>, Saskia Nur Fadhilah Kusnadi<sup>2,3\*</sup>, Edi Karyono Putro<sup>2,4</sup>, Danny Rosalinawati Ma'kdika Santoso<sup>2</sup>, dan Anthony Andorful Manuel<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Magister Terapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada

<sup>2</sup>Departemen HSE, Divisi Concentrating PT Freeport Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknologi Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, e-mail: [saskia.kusnadi@gmail.com](mailto:saskia.kusnadi@gmail.com)

<sup>4</sup>Program Doktor Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

<sup>5</sup>Department Technical Service, Divisi Concentrating PT Freeport Indonesia

## ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada industri mineral di Indonesia, yang berperan krusial dalam pertumbuhan ekonomi negara. Meskipun kontribusinya signifikan, pertumbuhan ini berdampak pada emisi debu, terutama selama proses penghancuran dan penggilingan bijih mineral. Debu tersebut berpotensi merusak kualitas udara dan mengancam kesehatan pekerja. Oleh karena itu, penelitian ini fokus pada penerapan teknologi *dry fog system* sebagai solusi untuk mengatasi masalah debu serta memperhatikan kualitas air yang mendukung sistem tersebut. Teknologi *dry fog system* bekerja dengan mengabutkan partikel air sangat kecil (kurang dari 10  $\mu\text{m}$ ), menangkap dan menjerat partikel debu di udara. Penelitian ini menemukan bahwa kualitas air yang digunakan dalam sistem ini baik (PI = 0,348). Hasil efisiensi *dry fog system* di lingkungan kerja menunjukkan bahwa lima dari tujuh lokasi memiliki efisiensi yang optimal, yaitu di atas 90%, sehingga menandakan keberhasilan implementasi. Namun, dua lokasi memerlukan penyesuaian dan perbaikan untuk meningkatkan efisiensinya. Maka dari itu, saat ini, penerapan *dry fog dust suppression system* tetap menjadi solusi ramah lingkungan untuk mengurangi dampak debu pada lingkungan dan kesehatan manusia. Dengan terus mengoptimalkan teknologi ini, diharapkan lingkungan kerja di industri mineral dapat menjadi tempat yang lebih aman dan sehat bagi para pekerja.

**Kata kunci:** *dry fog system*, efisiensi pengendalian debu, industri bijih mineral, *pollution index*, teknologi pengendalian debu

## ABSTRACT

This research focuses on the mineral industry in Indonesia, which plays a crucial role in the country's economic growth. Despite its significant contribution, this growth has implications for dust emissions, especially during the processes of crushing and grinding mineral ore. Dust has the potential to degrade air quality and jeopardize the health of workers. Therefore, this study concentrates on the application of dry fog system technology as a solution to address dust-related issues, along with observing water quality that supports the dry fog system. The dry fog system technology operates by atomizing very small water particles (less than 10  $\mu\text{m}$ ), capturing and settling dust particles in the air. The research reveals that the water quality used in this system is in good condition (PI = 0.348). The efficiency results of the dry fog system indicate that five out of seven locations have optimal efficiency, exceeding 90%, signifying successful implementation. However, two locations require adjustments and improvements to enhance efficiency. Therefore, at present, the application of the dry fog dust suppression system remains an environmentally friendly solution to reduce the impact of dust on the environment and human health. By continually optimizing this technology, it is expected that the working environment in the mineral industry can become a safer and healthier place for workers.

**Keywords:** dry fog system, dust control efficiency, mineral ore industry, pollution index, dust control technology

**Citation:** Susanto, A., Kusnadi, S. N. F., Putro, E. K., Santoso, D. R. M., dan Manuel, A. A. (2024). Tinjauan Efisiensi Pengendalian Debu dengan *Dry Fog System* di Industri Pengolahan Bijih Mineral. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 712-719, doi:10.14710/jil.22.3.712-719

## 1. PENDAHULUAN

Industri mineral menjadi salah satu kontributor dalam pertumbuhan ekonomi karena kekayaan sumber daya mineral (SDM) di Indonesia (Hanafi et al., 2019). Semakin berkembangnya sektor tersebut, tidak dapat diabaikan bahwa proses bisnis pengolahan bijih mineral juga menghasilkan emisi yang signifikan (Farjana et al., 2019). Dalam produksi mineral, pengolahannya mencakup beberapa proses seperti penambangan, penghancuran, penggilingan, pemurnian, serta pengelolaan limbah. Dalam pengolahannya, emisi yang dikeluarkan, terutama emisi debu, merupakan salah satu masalah lingkungan yang serius (Izydorczyk et al., 2021). Kualitas udara di sekitar lingkungan kerja akan terdampak, sehingga mengakibatkan bahaya terhadap kesehatan manusia (Abidin et al., 2021).

Debu dan partikel yang dihasilkan dari proses industri dapat berbahaya. Beberapa faktor yang mempengaruhi bahaya debu tersebut adalah karakteristik debu seperti, bentuk, konsentrasi, sifat kimiawi, serta lama paparan (Apsari et al., 2018). Ukuran debu yang halus dapat terhirup oleh manusia dan dapat terpenetrasi ke dalam saluran pernapasan serta melewati aliran darah. Hal ini dapat menyebabkan gangguan pernapasan, penyakit paru-paru, dan berbagai masalah kesehatan lainnya (Arba, 2019). Begitu juga dengan kandungan dari debu tersebut, seperti kandungan partikel halus, serat, ataupun gas lainnya yang dapat memperburuk kondisi pernapasan pekerja (Putri et al., 2021). Selain itu, emisi debu yang terhirup oleh pekerja juga dipengaruhi oleh beberapa faktor penting yang menentukan bahaya debu mencakup komposisi kimia, konsentrasi dan ukuran partikel debu, waktu paparan, serta kerentanan individu (Paluchamy et al., 2021).

Polutan debu juga berpengaruh terhadap kondisi lingkungan. Dengan adanya pencemaran udara, komponen debu dapat mencemari udara, dan menyebabkan hujan asam ataupun pemanasan global (Adelia & Mulyasari, 2018). Debu yang dapat bertahan lama di atmosfer dan bahkan terdispersi ke lokasi lain dapat mengubah keseimbangan nutrisi dalam ekosistem udara maupun perairan. Kerusakan yang ditimbulkan dapat mempengaruhi kondisi tanaman dan mengasamkan badan air (Manisalidis et al., 2020). Bahaya debu terhadap lingkungan dan manusia mendorong industri mineral untuk menerapkan teknologi pengendalian emisi debu yang tepat untuk mengeliminasi emisi debu secara efektif (Adeyanju & Okeke, 2019).

Penerapan pengelolaan debu menjadi hal penting yang ditekankan oleh pemerintah, sebagaimana dicantumkan kewajiban pengendalian pencemaran udara di industri. Hal tersebut diatur dalam Peraturan Pemerintah No.22 Tahun 2021 tentang *Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*, sebagaimana yang dimaksud dalam pelaksanaan Pasal 188. Dalam pasal tersebut, industri harus melakukan pencegahan,

penanggulangan, dan pemulihan dari dampak pencemaran udara (Pemerintah Indonesia, 2021). Pengendalian pencemaran udara bermaksud untuk meningkatkan kualitas udara di lingkungan kerja hingga sesuai dengan baku mutu yang telah diatur. Dengan adanya pengadaan pengendalian tersebut, kondisi area kerja akan menjadi aman bagi para pekerja (Zhang et al., 2022).

Pengelolaan debu di industri menjadi hal yang krusial untuk mengurangi emisi debu. Konsep yang digunakan untuk mengatasi debu emisi debu adalah sistem peredam debu atau *dust suppression system*. Teknik supresi debu cocok untuk lingkungan pengolahan bijih mineral, relatif murah, dan sangat efisien (Ma et al., 2020). Mekanisme dari sistem tersebut menggunakan air yang disemprotkan melalui *nozzle*. Aerosol yang keluar dari *nozzle* tersebut akan berada di udara dan membasahi, menggumpalkan, serta menurunkan partikel debu ke dasar permukaan (Ivanov & Strizhenok, 2017).

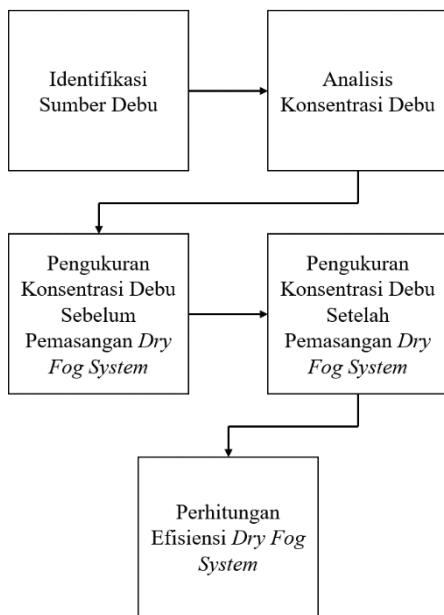
Berbagai kondisi parameter teknis dari teknologi *dust suppression system* dapat menunjukkan kinerja yang berbeda. Sebuah studi menunjukkan sistem tersebut dapat menekan konsentrasi debu yang dapat terhirup di udara hingga 78-93% (Xie et al., 2022). Salah satu teknologi *dust suppression system* yang dapat digunakan adalah *dry fog system*. Teknologi tersebut berpotensi menjadi salah satu pilihan terbaik untuk diaplikasikan di industri mineral. *Dry fog system* mampu mengatasi debu dengan cara yang efektif dan ramah lingkungan menggunakan air yang ditransformasi menjadi kabut kering. Kabut kering mampu mengurangi debu tanpa mempengaruhi kelembapan dari material bijih mineral (Saurabh et al., 2020).

Pengembangan *dust suppression system* dapat menjadi solusi untuk permasalahan debu di industri pengolahan bijih mineral. Dengan mengontrol dan mengurangi polusi udara, maka kesehatan, kesejahteraan, serta perlindungan lingkungan bagi pekerja ataupun berbagai kehidupan akan terjaga (Hardayanti et al., 2021). Hal tersebut ditujukan untuk menjaga lingkungan kerja yang aman, selamat, dan sehat (Li et al., 2021). Meskipun begitu, penggunaan *dry fog system* saat ini masih terbatas di sejumlah industri di Indonesia, termasuk pabrik kapur, pabrik semen, dan pabrik pengolahan mineral. Oleh karena itu, penelitian ini sangat penting dilakukan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai efektivitas kinerja dan nilai efisiensi dari sistem ini. Dengan adanya teknologi tersebut di PT X, penelitian ini dilakukan untuk menilai tingkat efisiensi dari teknologi yang sudah diterapkan di lokasi kerja industri pengolahan bijih mineral. Dengan demikian, penelitian dapat memberikan kontribusi yang lebih spesifik terhadap pemahaman tentang bagaimana teknologi ini dapat secara efektif mengeliminasi debu, sehingga dapat memberikan tempat kerja yang aman bagi karyawan serta dapat diaplikasikan pada industri-industri lain yang

memiliki proses yang menimbulkan terbentuknya debu.

**2. METODE**

Pelaksanaan penelitian ini berlangsung di area pengolahan bijih mineral di Papua, Indonesia. Studi kuantitatif dilakukan dengan perhitungan tingkat efisiensi mesin *dust suppression system* berjenis *dry fog system* atau sistem pengabutan kering. Proses dimulai dengan pengukuran konsentrasi debu sebelum penggunaan *dry fog system* dan setelah penggunaan sistem tersebut. Penelitian ini menggunakan data sekunder pengukuran kualitas udara pada beberapa lokasi kerja. Proses penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Proses Penelitian

Pengukuran konsentrasi debu dilakukan berdasarkan *the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Manual of Analytical Methods (NMAM) - 0600*. Metode ini dikhususkan untuk pengukuran *respirable particulates* atau partikulat yang dapat terhirup. Pengukuran debu melibatkan pompa pengambilan sampel dengan laju aliran 2 L/menit, tabung, klip, kaset filter PVC 5µ, dan berbagai perangkat lainnya untuk mengukur suhu, kelembapan, dan aliran angin/udara. Setelah menyiapkan peralatan yang dibutuhkan, pemilahan lokasi dilakukan untuk memastikan perwakilan kondisi lingkungan kerja. Saat melakukan pengukuran debu, seluruh pengambilan data dicatat dan didokumentasikan (NIOSH, 2014).

Setelah mendapatkan konsentrasi debu, perhitungan efisiensi dilakukan dengan Rumus (1) (Hong et al., 2021).

$$\eta = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100\%$$

Nilai efisiensi ( $\eta$ ) dalam % adalah nilai efisiensi dengan  $C_0$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) sebagai konsentrasi awal debu sebelum adanya *dust suppression system* dan  $C_1$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) sebagai nilai konsentrasi akhir setelah penggunaan *dust suppression system* ini.

Selain itu, untuk menjaga kualitas sumber air yang digunakan untuk sistem tersebut, perhitungan indeks polusi dilakukan. Indeks polusi atau *pollution index (PI)* diterapkan dengan Rumus (2) (Walukow et al., 2021).

$$PI = \sqrt{\frac{(Ci/Lij)^2_{maks} - (Ci/Lij)^2_{rerata}}{2}}$$

Analisis tersebut dimulai dengan menghitung  $C_i$  ( $\text{mg}/\text{L}$ ), yaitu konsentrasi parameter kualitas air dari hasil pengukuran.  $C_i$  dihitung dengan menggunakan rerata maupun maksimum dari pengukuran kualitas air yang telah dilakukan. Kemudian,  $Lij$  ( $\text{mg}/\text{L}$ ) merujuk kepada baku mutu parameter kualitas air. Baku mutu yang digunakan mengikuti Peraturan Menteri Kesehatan No. 32/2017 untuk media air keperluan higiene. Evaluasi nilai tersebut menggunakan indikasi nilai  $PI$  seperti tertera pada Tabel 1. Adapun parameter yang digunakan dapat merujuk pada Tabel 2.

**Tabel 1.** Evaluasi Nilai  $PI$

Rentang Nilai $PI$	Kategori
$0 \leq PI \leq 1$	Memenuhi Baku Mutu
$1 < PI \leq 5$	Cemar Ringan
$5 < PI \leq 10$	Cemar Sedang
$PI \geq 10$	Cemar Berat

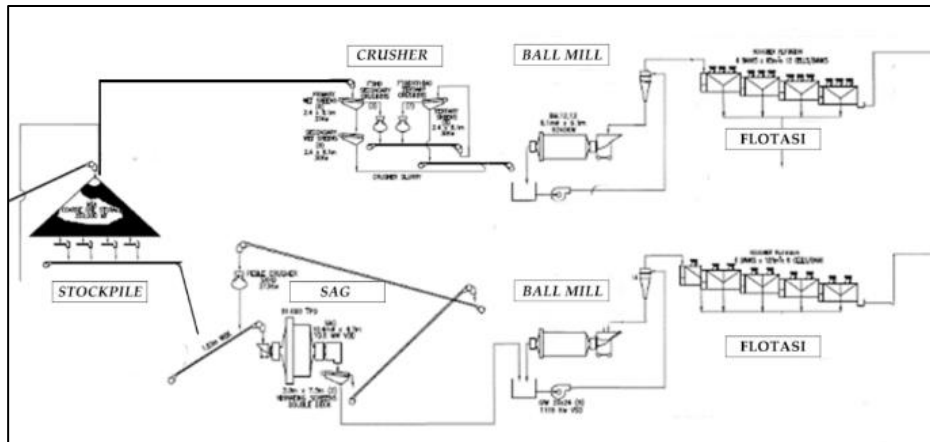
**Tabel 2.** Parameter Penilaian  $PI$

No	Parameter
1	pH
2	Turbidity
3	Total Hardness as $\text{CaCO}_3$
4	Total Dissolved Solid
5	Nitrite ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )
6	Nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )
7	Sulfate ( $\text{SO}_4$ )
8	Diss. Iron (Fe)
9	Diss. Manganese (Mn)
10	Diss. Selenium (Se)
11	Diss. Zinc (Zn)

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Identifikasi Sumber Debu**

Identifikasi sumber debu menjadi langkah awal yang penting sebelum penerapan sistem pengendalian debu. Salah satu sistem pengendalian debu tersebut yaitu seperti *Dry Fog System*. Sistem tersebut dibutuhkan karena adanya potensi emisi debu dari proses pengolahan bijih mineral. Pengolahan bijih mineral melibatkan serangkaian aktivitas. Di mana aktivitas tersebut seperti penghancuran, penggilingan, dan transportasi material, yang dapat menyebabkan pelepasan partikel-partikel debu ke udara, sehingga membahayakan pekerja. Gambar 2 memperlihatkan proses yang secara signifikan mempengaruhi konsentrasi debu di udara sekitar.



Gambar 2. Proses Pengolahan Bijih Mineral

Salah satu proses yang secara signifikan mempengaruhi konsentrasi debu di udara sekitar adalah proses penghancuran. Penghancuran melibatkan pengurangan material batuan dari *stockpile*. Selama proses ini, bijih mineral dihancurkan dan dipadatkan di antara dua permukaan besi, menghasilkan pengurangan ukuran sesuai yang diinginkan. Proses ini menggunakan pengolahan kering, sehingga menghasilkan debu di sekitar mesin penghancur. Sebaliknya, penggunaan *Semi Autogenous Mill* (SAG) melibatkan air, membentuk bubur konsentrat atau *slurry*, sehingga menghasilkan intensitas debu yang lebih rendah dibandingkan dengan mesin penghancur (*crusher*).

Setelah proses penghancuran, material kemudian masuk ke tahap penggilingan (*grinding*). Tahap penggilingan yang diterapkan di PT X menggunakan *Ball Mill*. Proses ini mirip dengan pengolahan menggunakan SAG, dengan melibatkan air dalam proses penggilingan material yang sebelumnya dihancurkan melalui *crusher* atau SAG. Proses ini juga berpotensi menghasilkan lebih sedikit debu dibandingkan dengan penghancuran. Setelah penggilingan, penambahan reagen kimia dilakukan untuk menghasilkan konsentrat tembaga dan emas (*Unpublished report, 2022*).

Potensi tinggi debu silika di area penghancur mendukung pengukuran konsentrasi debu di sekitarnya. Pengendalian debu secara spesifik dilakukan pada *conveyor belt* yang membawa bijih mineral penuh debu (*Unpublished report, 2022*). Hal ini mendorong kebutuhan teknologi *dust suppression system* yang harus diaplikasikan untuk menurunkan risiko penyakit akibat kerja (PAK) dari debu. Jika debu melebihi nilai ambang batas (NAB), pekerja yang terpapar debu secara terus-menerus dapat mengalami perubahan khas dalam pernapasan dan volume paru yang restriktif (Setyaningsih et al., 2023). Maka dari itu, salah satu teknologi *dry fog dust suppression system* diterapkan oleh industri pengolahan industri mineral ini.

### 3.2 *Dry Fog System*

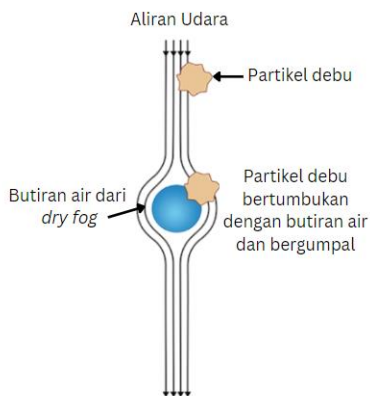
*Dry fog system* adalah teknologi yang menggunakan air untuk mengabutkan partikel-partikel kecil (*ultrafine*) ke udara guna mengendalikan debu. Sistem ini menghasilkan kabut air dengan ukuran partikel yang sangat kecil, kurang dari 10  $\mu\text{m}$ . Dengan butiran air tersebut, partikel-partikel debu dapat tereliminasi (Zhang, 2015). Prinsip kerja *dry fog system* didasarkan pada aglomerasi. Debu yang tersebar setelah melalui proses penghancuran akan melewati *conveyor belt* kemudian berpotensi terbawa angin dan menurunkan kualitas udara ambien di sekitar. *Dry fog system* akan menghasilkan kabut air berukuran mikron yang akan bertabrakan dengan partikel debu dan melekat satu sama lain (Roberts & Wypych, 2018). Pelepasan kabut air dilakukan oleh *nozzle* tepat di atas *conveyor belt*.

Pengaplikasian *dry fog system* cocok untuk digunakan di industri pengolahan bijih mineral, terutama pada proses penghancuran. Proses penghancuran membutuhkan kondisi kering, sehingga bijih mineral harus memiliki tingkat kelembapan yang rendah (Balasubramanian, 2017). Tantangan ini dijawab oleh implementasi *dry fog system* yang akan mengeluarkan butiran air yang mudah menguap, kemudian tetap menjaga bijih mineral yang kering. Sistem *dry fog* hanya menambahkan kelembapan kurang dari 0.1% terhadap bijih mineral (Chaulya et al., 2021). Hal ini sejalan dengan kebutuhan kelembapan untuk proses bijih mineral di pabrik.

Sistem ini dipilih untuk mengurangi konsentrasi debu di area kerja karena mekanismenya yang tidak membasahi bahan baku. Sistem ini hanya membasahi partikel yang tersuspensi di udara. *Dry fog system* lebih cocok dibandingkan teknologi lain, seperti *misting* atau *spraying system*. Di mana sistem *misting* ataupun *spraying* tersebut memiliki butiran air lebih besar dan menghasilkan kelembapan bijih mineral lebih tinggi. Butiran air dengan sistem tersebut memiliki ukuran 50-200  $\mu\text{m}$  (Saurabh et al., 2020).

### 3.3 Prinsip Desain Dry Fog System

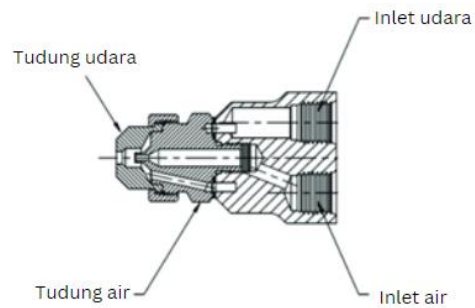
*Dry fog dust suppression system* memiliki komponen, yaitu *nozzle dry fog*, kompresor udara, pompa, tangki air, filter air, filter udara, unit pengendali aliran dan tekanan, kontrol listrik, serta saluran air dan udara. *Nozzle dry fog* menggunakan *nozzle* jenis *air atomizing nozzle* atau *nozzle* atomisasi air. *Nozzle* tersebut menggunakan udara bertekanan untuk memecah cairan menjadi butiran-butiran kecil yang akan membentuk kabut halus. Gambar 3 menunjukkan mekanisme pengambilan debu dari butiran air yang lebih kecil dibandingkan dengan butiran air yang lebih besar. Kabut halus tersebut dapat menangkap dan menjatuhkan partikel debu saat disemprotkan ke udara (Yuan et al., 2022). Kinerja atomisasi dari *nozzle* dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tekanan dan kuantitas pasokan udara dan air, serta sudut instalasi *nozzle* (Wang et al., 2019; Li et al., 2022).



**Gambar 3.** Butiran air yang lebih kecil efektif dalam mengambil partikel debu halus. (Sumber: DSI - nodust.com)

Konsumsi air yang digunakan berada pada rentang 3-13 GPH atau 11-50 L/jam. Konsumsi air yang rendah menjadi keunggulan utama sistem ini. Rentang konsumsi air sekitar 3-13 GPH atau 11-50 L/jam menunjukkan penggunaan air yang efisien dibandingkan dengan metode tradisional lainnya (DSI, 2023). Keunggulan ini diperkuat oleh regulasi pompa udara menggunakan kompresor udara dengan rentang tekanan 80-150 psi. Adapun untuk pompa air memiliki rentang tekanan 50-120 psi.

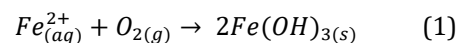
*Dry fogger system* juga memiliki konsumsi udara sebesar 3-7.5 scfm atau 5.1-12.7 m<sup>3</sup>/jam dan memiliki *orifice* udara dengan diameter 0.52"-0.78" atau 1.3-1.98 mm. Udara bertekanan diarahkan melalui *orifice* udara ini, menciptakan aliran udara yang kuat. Udara yang masuk melalui inlet udara (*air inlet*) pada sistem seperti yang terlihat dalam Gambar 4. Ketika udara bertemu dengan cairan yang akan disemprotkan, tekanan udara memecah cairan menjadi butiran-butiran kecil yang lebih kecil dari 10 mikron. Saat tekanan pasokan udara meningkat, dampak yang signifikan terjadi dalam sistem.



**Gambar 4.** Diagram *air atomizing nozzle* (Sumber: Xiao et al., 2018)

Tekanan dan laju aliran udara dalam ruang pencampuran *nozzle* meningkat. Peningkatan tekanan pasokan udara memiliki pengaruh pada proses pemecahan air menjadi butiran-butiran kecil. Butiran-butiran air ini menjadi jauh lebih kecil dengan adanya peningkatan tekanan udara dan memberikan dampak positif, yakni proses atomisasi cairan yang lebih optimal (Wang et al., 2019). Selain itu, penjagaan kualitas udara dan air yang digunakan juga dilakukan. Hal ini diterapkan untuk mencegah tersumbatnya kontaminasi partikel yang masuk ke dalam inlet (Yin et al., 2019).

Penjagaan kualitas air dapat meningkatkan efisiensi dari eliminasi emisi debu (Wang, 2022). Air dengan kandungan partikulat atau bahan kimia seperti kalsium dan magnesium dapat menyebabkan masalah *fouling* atau penyumbatan pada *orifice nozzle*. Kalsium dan magnesium, yang dikenal sebagai penyebab kesadahan air, dapat berinteraksi dengan kandung lain seperti, CO<sub>3</sub> dan mengendap, membentuk lapisan kerak pada permukaan *orifice nozzle* yang terbuat dari logam yang tidak bisa tahan dari kerak (Alhamid et al., 2021). Selain itu, kandungan lainnya seperti besi dan mangan terlarut dalam air juga memiliki pengaruh signifikan. Ketika air bereaksi dengan oksigen atau unsur pengikat lainnya seperti pada reaksi kimia (1), oksidasi besi (Fe<sup>2+</sup>) dan mangan (Mn<sup>2+</sup>) dapat terjadi, sehingga menjadi besi (Fe<sup>3+</sup>) dan mangan (Mn<sup>3+</sup>) dalam bentuk padatan/endapan (Febrina & Ayuna, 2015). Padatan tersebut dapat menyebabkan terbentuknya endapan padat yang dapat menyumbat *nozzle*.



Kualitas air yang digunakan dalam sistem *dry fog system* telah ditinjau untuk mencegah penyumbatan. Kualitas air yang digunakan untuk sistem *dry fog system* dijelaskan melalui metode PI oleh Rumus 2. Hasil perhitungan PI sebesar 0,348 mengindikasikan bahwa kualitas air berada dalam *standar* yang telah diatur. Air tersebut juga menunjukkan kualitas dengan baku mutu kelas A atau baik sekali. Sumber air ini telah disesuaikan dengan standar yang diperlukan untuk pencegahan penyumbatan ataupun penggumpalan pada *nozzle*. Dengan demikian, potensi penyumbatan dari *nozzle, orifice*, ataupun pipa

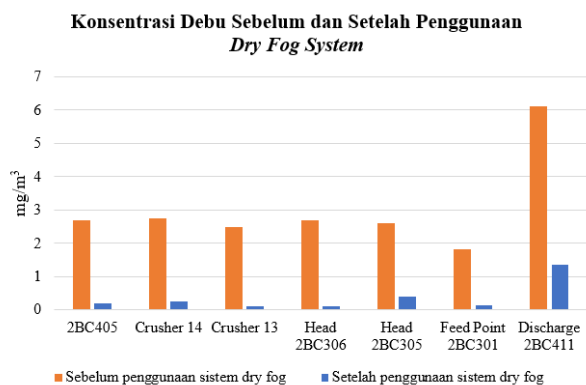


Susanto, A., Kusnadi, S. N. F., Putro, E. K., Santoso, D. R. M., dan Manuel, A. A. (2024). Tinjauan Efisiensi Pengendalian Debu dengan *Dry Fog System* di Industri Pengolahan Biji Mineral. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 712- 719, doi:10.14710/jil.22.3.712-719

saluran air akan berkurang, sehingga mengurangi waktu perawatan dari peralatan sistem ini (Pairan et al., 2022).

### 3.4 Efisiensi *Dry Fog System*

Efisiensi *dry fog system* diukur berdasarkan perbandingan konsentrasi debu, yaitu pada sebelum dan setelah penerapan sistem ini. Pengukuran dilakukan sebelum adanya sistem *dry fog* dan setelah penggunaan sistem tersebut. Hasil pengukuran debu dapat dilihat pada Gambar 5. Konsentrasi debu mengalami penurunan pada seluruh lokasi dari sebelum adanya *dry fog system* hingga setelah penggunaan *dry fog system*. Konsentrasi debu di kedua periode tersebut telah menunjukkan kepatuhan terhadap NAB yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia No. 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan Kerja. NAB berada pada 10 mg/m<sup>3</sup>, sedangkan konsentrasi debu sebelum dan setelah penggunaan sistem *dry fog* berada di bawah nilai tersebut. Meskipun begitu, penurunan konsentrasi debu tetap dibutuhkan untuk memastikan komposisi kimia dalam debu, seperti debu silika maupun asbestos, tidak melebihi batas aman dan tidak terhirup oleh pekerja (Margan et al., 2022; Sinaga et al., 2020).



**Gambar 5.** Konsentrasi Debu Sebelum dan Setelah Adanya *Dry Fog System*

Hasil perhitungan nilai efisiensi dari konsentrasi debu pada tahun pertama (sebelum penggunaan *dry fog system*) dan kedua (setelah penggunaan *dry fog system*) ini sebagaimana tertera dalam Tabel 3, mengungkapkan sejumlah temuan yang signifikan. Dalam penelitian ini, efisiensi penggunaan *dry fogger system* diidentifikasi pada berbagai lokasi yang berbeda di lingkungan operasional industri pengolahan biji mineral. Terutama, ditemukan di lima lokasi memiliki efisiensi yang mencapai angka di rentang 88,5-98,7%, konsisten dengan hasil penemuan dari penelitian sebelumnya oleh Chaulya dkk. (2021). Efisiensi dengan rentang tersebut ditemukan pada *dry fog system* di lokasi 2BC405, *Crusher 14*, *Crusher 13*, *Head 2BC306*, dan *Feed Point 2BC301*. Temuan ini mengindikasikan bahwa

penggunaan sistem *dry fog system* di titik pemuatan material memberikan dampak yang sangat efektif dalam mengendalikan debu dan menangkap serta menjerat partikel-partikel debu yang dihasilkan selama proses operasional.

**Tabel 3.** Hasil perhitungan efisiensi setelah penggunaan *dry fog*

Lokasi	Efisiensi
2BC405	92%
<i>Crusher 14</i>	91%
<i>Crusher 13</i>	96%
<i>Head 2BC306</i>	96%
<i>Head 2BC305</i>	85%
<i>Feed Point 2BC301</i>	93%
<i>Discharge 2BC411</i>	78%

Di sisi lain, lokasi lainnya menunjukkan efisiensi di bawah 88,5%, seperti *Head 2BC305* yang memiliki efisiensi sebesar 85% dan *Discharge 2BC411* dengan efisiensi 78%. Namun, efisiensi yang dimiliki oleh *dry fogger system* pada lokasi *Head 2BC306* telah berada pada rentang efisiensi yang sesuai dengan teknologi *dust suppression system* secara umum, yaitu mencapai rentang 78 hingga 93% (Xie et al., 2022). Temuan efisiensi yang lebih rendah di kedua area tersebut dikarenakan oleh area kerja yang terbatas, sehingga aliran udara membatasi penurunan konsentrasi debu. Penurunan efisiensi yang ditemukan di kedua area penelitian dapat dikarenakan oleh keterbatasan ruang kerja yang mempengaruhi aliran udara. Keberadaan area kerja yang terbatas menyebabkan kurangnya aliran udara, sehingga membatasi kemampuan sistem dalam menurunkan konsentrasi debu. Selain itu, hal ini juga dapat terjadi karena tingginya konsentrasi debu yang dihasilkan di area tersebut, seperti konsentrasi debu sebelum penggunaan *dry fog* yang mencapai 6,1 mg/m<sup>3</sup>, sehingga membutuhkan penyesuaian *dry fog system* lebih lanjut. Perbaikan yang dapat dilakukan meliputi penyesuaian tekanan, kuantitas, dan kualitas pasokan udara dan air, tempat instalasi ataupun sudut instalasi *nozzle* (Wang et al., 2019).

### 4. KESIMPULAN

Proses pengolahan biji mineral menghasilkan partikel-partikel debu dalam tahapan seperti penambangan, penghancuran, dan penggilingan, yang berpotensi berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Maka dari itu, penerapan *dust suppression system* menggunakan *dry fog* dilakukan. Sistem tersebut telah berhasil menghilangkan debu dengan efisiensi di atas 90% untuk lima lokasi, sedangkan dua lokasi lainnya masih membutuhkan perbaikan yang sesuai. Penyesuaian tersebut dapat menggunakan alternatif lain bagi pasokan udara dan air, tempat instalasi maupun sudut instalasi *nozzle*. Selain itu, penggunaan sistem *dry fog* juga harus dipelihara dengan baik agar efisiensi eliminasi debu dapat terus meningkat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, A., Henita, V., Rahmawati, S., dan Maziya, F. (2021). Analisis Risiko Kesehatan Paparan Debu Terhadap Fungsi Paru pada Pekerja di Home Industry C-Max. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. 13(1), 34-39. DOI:10.20885/jstl.vol13.iss1.art3
- Adelia, N. dan Mulyasari, T. (2018). Kadar Debu Udara Pada Bagian Produksi UD.Mandiri di Desa Teluk Kecamatan Purwokerto Selatan Kabupaten Banyumas Tahun 2018. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Masyarakat* 38(2), 124-243. DOI: <https://doi.org/10.31983/keslingmas.v38i2.4877>
- Adeyanju, E. dan Okeke, C. (2019). Exposure effect to cement dust pollution: a mini review. *SN Applied Sciences* 1:1572. *SN Applied Sciences* (2019) 1:1572 DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1583-0>
- Alhamid, I. Rainanda, A., dan Miftah, R. (2021). Effectiveness Analysis of Ozonation for Prevention of Corrosion and Precipitation of Crust in Closed System Cooling Towers. *Joint Journal of Novel Carbon Resources Sciences & Green Asia Strategy*, 8(4), 904-909. <https://doi.org/10.5109/4742140>
- Apsari, L., Budiyo, dan Setiani, O. (2018). Hubungan Paparan Debu Terhirup dengan Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja Pertambangan Pasir dan Batu Perusahaan X Rowosari Kota Semarang, 6(4), 463-476. DOI: <https://doi.org/10.14710/jkm.v6i4.21455>
- Arba, S. (2019). Kosentrasi Respirable Debu Particulate Matter (Pm<sub>2,5</sub>) Dan Gangguan Kesehatan Pada Masyarakat Di Pemukiman Sekitar PLTU. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*. 9(2): 178-184. DOI: <https://doi.org/10.56338/pjkm.v9i2.963>
- Balasubramanian, A. (2017) Size Reduction by Crushing Method. doi:10.13140/RG.2.2.28195.45606.
- Chaulya, S., Chowdhury, A., Kumar, S., Singh, R., Singh, S., Singh, R., Prasad, G., Mandal, K., dan Banerjee, G. (2021). Fugitive dust emission control study for a developed smart dry fog system. *Journal of Environmental Management* 285, 112116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112116>
- Dust Solutions Inc. (DSI). (2023). Dry Fog Systems. <https://nodust.com/solutions/dry-fog-solutions/#products-section>
- Farjana, S., Huda, N., dan Mahmud, M. (2019). Life cycle analysis of copper-gold-lead-silver-zinc beneficiation process. *Science of the Total Environment* 659, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.318>
- Febrina, L. dan Ayuna, A. (2015). Studi Penurunan Kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn) dalam Air Tanah Menggunakan Saringan Keramik. *Jurnal Teknologi*, 7(1), 35-44. DOI: 10.24853/jurtek.7.1.35-44
- Fitria, L. (2009). Program Langit Biru : Kontribusi Kebijakan Pengendalian Pencemaran Udara Kota terhadap Penurunan Penyakit Pernapasan pada Anak. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*. 4(3), 19-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.21109/kesmas.v4i3.182.g182>
- Hanafi, M., Wibisono, D., Mangkusubroto, Siallagan, M., dan Badriyah, M. (2019). Designing smelter industry investment competitiveness policy in Indonesia through system dynamics model. *Journal of Science and Technology Policy Management* 10 (3), 617-641. DOI:10.1108/JSTPM-06-2018-0064
- Hardayanti, N., Huboyo, H., dan Dermawan, M. (2021). Rancang Bangun *Green Belt* untuk Pengendalian Pencemaran Debu di Kawasan Industri Terboyo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(3), 681-689. doi: 10.14710/jil.19.3.681-689
- Hong, N., Peng S., Ye, Y., Hu, T., & Su, N. (2021). Monitoring of the Effects of Dry and Dry Dust Removal Equipment at a Coal Port Transfer Station. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Doi:10.1088/1755-1315/621/1/012164
- Ivanov, A. dan Strizhenok, V. (2017). Efficiency of Dust Suppression with Aerosol Guns–Fogging Machines with Air-and-Fluid Jets. *Journal of Mining Sciences*. 53(1), 176-180. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739117011994>
- Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., dan Chojnacka, K. (2021). Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research* 197, 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
- Li, H., Wang, J., Wang, P., Liu, J., Yuan, X., dan Han, H. (2022). Effect of the Installation Angle of Nozzle on the Atomizing Performance of Air-Assisted Spraying Dust Suppression Device. *Atmosphere*, 13(4), 520. <https://doi.org/10.3390/atmos13040520>
- Li, S., Zhao, B., Lin, H., Shuang, H., Kong, X., dan Yang, E. (2021). Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness. *Process Safety and Environmental Protection*. 154, 410-424. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.037>
- Ma, Q., Nie, W., Yang, S., Xu, C., Peng, H., Liu, Z., Guo, C., dan Cai, X. (2020). Effect of spraying on coal dust diffusion in a coal mine based on a numerical simulation, *Environmental Pollution* 264:114717. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114717>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., dan Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front. Public Health* 8(14), 1-13. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014
- Margan, A., Verlak, D., Roj, G., dan Fikfak, M. (2022). Occupational exposure to silica dust in Slovenia is grossly underestimated. *Arh Hig Rada Toksikol*, 73(4), 297-302. DOI: <https://doi.org/10.2478/aiht-2022-73-3668>
- Pairan, M., Osman, S., Nasir, A., Seth, N., Hisham, M., Mazlan, A., Jambari, dan Aripin, M. (2022). The Blockage Ratio Effect to The Spray Performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 95(1), 99-109. <https://doi.org/10.37934/arfmts.95.1.99109>
- Paluchamy, B., Mishra, D., dan Panigrahi, D. (2021). Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines e Generation, health impacts and control measures for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 45:2291-2308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126524>
- Pemerintah Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Putri, A., Marlia A., Mar'ah, E., Suswoyo F., Hanief, M., dan Firdaus, V. (2021). Review Sistematis: Identifikasi Bahaya Paparan Debu Silika pada Pekerja Tambang. *Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*. 1(3):162-169. DOI: <https://doi.org/10.37148/comphijournal.v1i3.30>
- PT X. (2023). *Unpublished Report*. Papua, Indonesia.

- Susanto, A., Kusnadi, S. N. F., Putro, E. K., Santoso, D. R. M., dan Manuel, A. A. (2024). Tinjauan Efisiensi Pengendalian Debu dengan *Dry Fog System* di Industri Pengolahan Bijih Mineral. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 712- 719, doi:10.14710/jil.22.3.712-719
- Roberts, J. dan Wypych, P., (2018). Research, development and application of dust suppression technology. In: Proceedings of the 18th Coal Operators' Conference, Mining Engineering. University of Wollongong, Australia, 319–328.
- Saurabh, K., Chaulya, S., Singh, R., Kumar, S., dan Mishra, K. (2020). Intelligent dry fog dust suppression system: an efficient technique for controlling air pollution in the mineral processing plant. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24, 1037-1051. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01991-z>
- Setyaningsih, Y., Wahyuni, I., Kurniawan, B., Ekawati. (2023). Kadar Debu Lingkungan Kerja dan Kapasitas Kerja sebagai Determinan Penurunan Kapasitas Fungsi Paru. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(2), 214-220. DOI : 10.14710/jkli.22.2.214-220
- Sinaga, N., Hutagalung, P., dan Andriana, J. (2020). Waspada Pneumokoniosis pada Pekerja di Industri Pertambangan. *Jurnal Kedokteran Universitas Palangka Raya* 8(1), 935-945. DOI: <https://doi.org/10.37304/jkupr.v8i1.1498>
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2014). *Manual of Analytics Methods* (Edisi 5). Centers for Disease Control and Prevention.
- Walukow, A., Triwiyono, dan Sukarta, I. (2021). Analisis Tingkat Pencemaran Air di Kali Kampwolker Sebagai Inlet ke Perairan Danau Sentani dengan Menggunakan Metode *Pollution Index*. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 10(1), 68-74. DOI:10.23887/jst-undiksha.v10i1.33050
- Wang, Y. (2022). Overview of Downhole Spray Dust Removal Technology. *IOP Science: Earth and Environmental Science*, 558. DOI:10.1088/1755-1315/558/4/042052
- Wang, P., Zhang, K., dan Liu, R. (2019). Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle. *Powder Technolgy*, 355, 393-407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.040>
- Xiao, Y., Xia, Z., Huang, L., dan Ma, L. (2018) Atomization of Gel Fuels with Solid Particle Addition Utilizing an Air Atomizing Nozzle. *Energies* 11(11), 2959. DOI:10.3390/en11112959
- Xie, Z., Huang, C., Zhao, Z., Xiao, Y., Zhao, Q., Lin, J. (2022). Review and prospect the development of dust suppression technology and influencing factors for blasting construction, Tunnelling, and Underground Space Technology 125, 104532. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104532>
- Yin, W, Zhou, G., dan Gao, D. (2019) Simulation analysis and engineering application of distribution characteristics about multi-stage atomization field for cutting dust in fully mechanized mining face. *Advanced Powder Technology*, 30(11), <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.08.007>
- Zhang Y., Shi, T., Wang, A., dan Huang Q. (2022). Air Pollution, Health Shocks, and Labor Mobility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1382. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031382>
- Zhang, Y. (2015). Application of dry fog dust suppression technology in the coal conveyer belt system of thermal power plants. *Advanced Materials Research Vols.* 1073-1076, 733-837. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076>.