Empiricism Journal
https://journal-center.litpam.com/index.php/empiricism
email: empiric.journal@gmail.com

Vol. 7, No 3, Sep. 2026
e-ISSN: 2745-7613
pp. 3605-3619

Inovasi Sistem Ventilasi untuk Pengendalian Karbon Monoksida (CO) pada Aktivitas *Thermic Lancing* di dalam SAG Mill

Fredy Tandilolo[1], & Umar[2]*
[1]Program Studi Manajemen Inovasi, [2]Program Studi Bahasa dan Kebudayaan Inggris, Universitas Teknologi Sumbawa, Jl. Olat Maras, Pernek, Moyo Hulu, Sumbawa, Indonesia 84371.
Email Correspondence: umar@uts.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja ventilasi eksisting, mengembangkan sistem ventilasi inovatif berbasis *engineering control*, dan merumuskan rekomendasi penguatan prosedur keselamatan selama aktivitas *thermic lancing* di dalam *Semi-Autogenous Grinding* (SAG) Mill. Penelitian menggunakan metode campuran dengan desain sekuensial eksplanatori. Pengujian kuantitatif menerapkan eksperimen semu sebelum dan sesudah intervensi melalui pengukuran konsentrasi karbon monoksida (CO), kapasitas aliran udara, dan durasi pembersihan atmosfer (*purging*). Data kualitatif diperoleh melalui wawancara terhadap 31 informan, observasi lapangan, dan telaah dokumen keselamatan. Hasil menunjukkan bahwa sistem ventilasi eksisting memiliki kapasitas pembuangan 4.094 m³/jam dengan tingkat pertukaran udara (*Air Changes per Hour*/ACH) nominal sebesar 8,19 kali/jam. Sistem tersebut membutuhkan 25 menit untuk menurunkan konsentrasi CO dari 162 ppm hingga mencapai ≤25 ppm. Setelah inovasi menggunakan *blower fan* berkapasitas 10.000 m³/jam dan *exhaust jet fan* 15.480 m³/jam, ACH nominal meningkat menjadi 30,96 kali/jam. Konsentrasi CO menurun dari 224 menjadi 17 ppm dalam lima menit, setara penurunan sebesar 92,4%. Durasi mencapai konsentrasi CO ≤25 ppm berkurang sebesar 80%, sedangkan waktu untuk mencapai pembacaan 0 ppm menurun dari 60 menjadi 10 menit. Temuan ini menunjukkan peningkatan kinerja *purging* secara deskriptif dan memberikan dasar bagi pengembangan *Standard Task Procedure* (STP). Validasi melalui pengujian berulang diperlukan untuk memastikan konsistensi efektivitas sistem.

Kata kunci: Karbon Monoksida; *Thermic Lancing;* SAG Mill; *Air Changes per Hour.*

Ventilation System Innovation for Carbon Monoxide (CO) Control on Thermic Lancing Activities inside SAG Mill

Abstract

This study aimed to evaluate the existing ventilation system, develop an innovative engineering-control-based ventilation configuration, and formulate recommendations for strengthening safety procedures during thermic lancing activities inside a Semi-Autogenous Grinding (SAG) Mill. An explanatory sequential mixed-methods design was employed. The quantitative component used a quasi-experimental pretest–posttest approach to measure carbon monoxide (CO) concentrations, airflow capacity, and atmospheric purging time. Qualitative data were collected through interviews with 31 informants, field observations, and reviews of safety documents. The existing ventilation system had an exhaust airflow capacity of 4,094 m³/h and a nominal air change rate of 8.19 air changes per hour (ACH). It required 25 minutes to reduce CO concentrations from 162 ppm to ≤25 ppm. Following the intervention, an inlet blower fan rated at 10,000 m³/h and an exhaust jet fan rated at 15,480 m³/h increased the nominal ACH to 30.96. CO concentrations decreased from 224 to 17 ppm within five minutes, representing a 92.4% reduction. The time required to reach ≤25 ppm decreased by 80%, while the time to obtain a 0 ppm instrument reading decreased from 60 to 10 minutes. These findings indicate improved descriptive purging performance and provide a basis for developing a dedicated Standard Task Procedure (STP). Further replicated testing is needed to establish the consistency of system effectiveness.

Keywords: *Carbon Monoxide; Thermic Lancing; SAG Mill; Air Changes per Hour.*

How to Cite: Tandilolo, F., & Umar, U. (2026). Inovasi Sistem Ventilasi untuk Pengendalian Karbon Monoksida (CO) pada Aktivitas Thermic Lancing di dalam SAG Mill. *Empiricism Journal*, *7*(3), 3605-3619. https://doi.org/10.36312/ej.v7i3.6151

https://doi.org/10.36312/ej.v7i3.6151

Copyright© 2026, Tandilolo, & Umar.
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

PENDAHULUAN

Industri pertambangan mineral memiliki peran strategis dalam penyediaan bahan baku industri global, terutama tembaga dan emas, sehingga keandalan fasilitas pengolahan menjadi faktor penting dalam menjaga produktivitas. Salah satu tahapan utama pengolahan mineral adalah komminusi, yaitu proses pengecilan ukuran batuan melalui penghancuran dan

penggilingan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan mineral berharga. Optimalisasi proses ini berpengaruh terhadap konsumsi energi, kapasitas pengolahan, dan biaya operasional perusahaan (Mardatilla, 2021). Dalam proses tersebut, *Semi-Autogenous Grinding* (SAG) Mill merupakan peralatan utama yang memanfaatkan kombinasi tumbukan bijih, bola baja, dan abrasi untuk memperkecil ukuran material. Kinerja SAG Mill sangat bergantung pada kondisi komponen internal, khususnya *liner* yang melindungi dinding silinder dari benturan dan keausan. Penelitian Beloglazov dan Plaschinsky (2024), Pural et al. (2024), serta Li et al. (2026) menunjukkan bahwa degradasi *liner* berkaitan dengan efisiensi penggilingan, keandalan peralatan, dan kebutuhan pemeliharaan. Oleh karena itu, pemeliharaan SAG Mill perlu mempertimbangkan aspek produktivitas sekaligus keselamatan pekerja.

Pemeliharaan SAG Mill umumnya dilakukan melalui penghentian operasi terencana (*shutdown*) untuk memeriksa dan mengganti *liner* yang mengalami keausan. Setiawan (2019) menjelaskan bahwa penggantian *liner* merupakan kegiatan penting untuk mempertahankan integritas mekanis unit penggilingan. Namun, proses pelepasan *liner* dapat menghadapi kendala akibat deformasi, kerusakan baut, atau melekatnya komponen pada dinding *mill*. Kondisi tersebut membutuhkan teknik pemotongan khusus, salah satunya *thermic lancing*, yang memanfaatkan reaksi pembakaran eksotermik dengan suplai oksigen untuk memotong material logam. Proses ini menghasilkan temperatur sangat tinggi yang dapat mencapai sekitar 4.000°C, bergantung pada kondisi operasional (Cigweld, 2025). Meskipun efektif untuk melepaskan komponen yang sulit dibongkar, aktivitas tersebut berpotensi menghasilkan asap logam dan gas berbahaya. Risiko semakin kompleks karena pekerjaan berlangsung di dalam SAG Mill yang memiliki keterbatasan akses dan distribusi udara yang tidak selalu merata.

Karbon monoksida (CO) merupakan salah satu kontaminan atmosfer yang perlu dikendalikan selama aktivitas *thermic lancing*. Gas ini tidak berwarna dan tidak berbau sehingga keberadaannya sulit dikenali tanpa instrumen pemantauan. Paparan CO dapat mengganggu pengangkutan oksigen melalui pembentukan karboksihemoglobin serta memengaruhi respirasi seluler, yang berpotensi menyebabkan gangguan neurologis dan kardiovaskular (Rose et al., 2017). Nurhadi (2021) menekankan pentingnya pengendalian CO pada pekerjaan industri di ruang terbatas karena akumulasi gas dapat membahayakan pekerja. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 2019) juga mengidentifikasi CO sebagai kontaminan berbahaya yang memerlukan pengendalian paparan secara ketat. Di Indonesia, Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 menjadi dasar pengendalian faktor kimia di lingkungan kerja, termasuk penetapan Nilai Ambang Batas (NAB) CO sebesar 25 ppm sebagai rata-rata tertimbang waktu selama delapan jam kerja.

Risiko paparan CO meningkat ketika pekerjaan panas dilakukan di dalam ruang terbatas (*confined space*) dengan ventilasi yang tidak memadai. Geometri silinder SAG Mill, keterbatasan bukaan *manhole*, dan posisi sumber emisi dapat memengaruhi distribusi udara serta pembentukan zona pertukaran udara rendah (*dead-air zones*). Penelitian mengenai ventilasi ruang terbatas menunjukkan bahwa pola aliran, posisi pemasukan dan pembuangan udara, serta karakteristik kontaminan memengaruhi efektivitas pengenceran dan pembuangan polutan (Li et al., 2021; Zhang et al., 2020; Cheng et al., 2024). Turner et al. (2022) juga menekankan pentingnya distribusi aliran udara dalam mengevaluasi ventilasi struktur industri tertutup. Dengan demikian, kecukupan ventilasi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan kapasitas nominal peralatan, tetapi juga perlu mempertimbangkan distribusi aliran aktual dan konsentrasi kontaminan pada area pernapasan pekerja.

Ventilasi mekanis merupakan salah satu bentuk pengendalian rekayasa (*engineering control*) dalam hierarki pengendalian risiko keselamatan dan kesehatan kerja. NIOSH (2024) menempatkan pengendalian rekayasa di atas pengendalian administratif dan alat pelindung diri karena mampu mengurangi paparan melalui intervensi teknis. Prinsip ini sejalan dengan standar OSHA 29 CFR 1910.146 yang mengatur identifikasi bahaya atmosfer, pengujian kondisi udara, dan pengendalian atmosfer selama pekerjaan di ruang terbatas (OSHA, 2015). Pedoman *Industrial Ventilation* dari ACGIH (2023) juga menekankan pentingnya perancangan sistem berdasarkan karakteristik sumber kontaminan dan kebutuhan pengendalian paparan. Oleh karena itu, efektivitas ventilasi perlu dievaluasi melalui debit udara, *Air Changes per Hour* (ACH), distribusi aliran, dan waktu pembersihan kontaminan (*purging time*), disertai pemantauan kualitas atmosfer secara langsung.

Pada aktivitas *thermic lancing* di SAG Mill PT Amman Mineral Nusa Tenggara, pengukuran awal menunjukkan keterbatasan sistem ventilasi eksisting dalam mengendalikan akumulasi CO. Sistem tersebut menggunakan *Venturi air mover* dengan kapasitas suplai 2.047 m³/jam dan kapasitas pembuangan gabungan 4.094 m³/jam. Berdasarkan volume internal SAG Mill sebesar 500 m³, nilai ACH yang dihitung dari kapasitas pembuangan mencapai 8,19 kali per jam. Namun, konsentrasi CO pada pengamatan awal tercatat mencapai 162 ppm, sedangkan waktu yang diperlukan untuk menurunkannya hingga mencapai batas operasional 25 ppm adalah 25 menit. Temuan ini mengindikasikan bahwa kapasitas pertukaran udara secara volumetrik belum sepenuhnya mencerminkan efektivitas pengendalian kontaminan pada lokasi pengukuran. Keterbatasan tersebut berpotensi memperpanjang waktu tunggu pekerjaan, mengganggu kelancaran pemeliharaan, dan meningkatkan kebutuhan pengawasan atmosfer kerja.

Pengendalian sebelumnya telah didukung oleh prosedur keselamatan, izin memasuki ruang terbatas, pemantauan gas, dan penghentian pekerjaan ketika kondisi atmosfer tidak memenuhi persyaratan. Namun, pengendalian administratif belum dapat menggantikan perbaikan teknis apabila kapasitas dan distribusi ventilasi tidak sesuai dengan karakteristik emisi. Tidd dan Bessant (2020) menjelaskan bahwa inovasi teknologi memerlukan integrasi pengembangan solusi teknis, kemampuan organisasi, dan pembelajaran operasional. Schilling (2020) juga menekankan pentingnya kapabilitas organisasi dalam mengembangkan serta menerapkan perubahan teknologi untuk meningkatkan kinerja. Dalam konteks keselamatan SAG Mill, kedua perspektif tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas inovasi ventilasi membutuhkan dukungan kompetensi operator, pengawasan teknis, dan standardisasi prosedur kerja agar penerapannya berlangsung konsisten.

Penelitian terdahulu telah membahas optimasi ventilasi, penyebaran gas berbahaya, dan pengaruh karakteristik aliran udara pada ruang industri tertutup (Baker & White, 2024; Li et al., 2021; Turner et al., 2022; Cheng et al., 2024). Namun, kajian yang secara khusus mengevaluasi konfigurasi ventilasi mekanis selama aktivitas *thermic lancing* di dalam SAG Mill melalui pengukuran lapangan masih terbatas. Secara khusus, hubungan antara peningkatan ACH, penurunan konsentrasi CO, percepatan waktu *purging*, dan integrasi pengendalian teknis ke dalam prosedur keselamatan belum banyak dikaji secara terpadu. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya pengembangan dan validasi sistem ventilasi yang mempertimbangkan karakteristik emisi pekerjaan panas serta kondisi geometris SAG Mill. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian komparatif konfigurasi ventilasi eksisting dan inovatif, pengukuran langsung efektivitas pengendalian CO, serta pengintegrasian hasil rekayasa ke dalam standardisasi keselamatan kerja. Penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa peningkatan kapasitas dan perbaikan konfigurasi ventilasi mekanis mampu mempercepat penurunan konsentrasi CO serta mengurangi waktu *purging* dibandingkan sistem eksisting. Pendekatan tersebut diharapkan mendukung pengembangan teknologi pemeliharaan pertambangan yang lebih aman dan adaptif (Nugroho, 2024).

Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem ventilasi eksisting dalam mengendalikan konsentrasi CO selama aktivitas *thermic lancing* di dalam SAG Mill; mengembangkan dan menguji konfigurasi ventilasi inovatif berbasis *engineering control* melalui pengaturan kapasitas suplai dan pembuangan udara untuk meningkatkan efektivitas penurunan konsentrasi CO serta mempercepat waktu *purging*; dan merumuskan strategi penerapan hasil inovasi ke dalam *Standard Task Procedure* (STP) perusahaan guna memperkuat pengendalian risiko atmosfer berbahaya.

METODE

Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menerapkan desain Metode Campuran (*Mixed Methods Research*) guna memperoleh pemahaman komprehensif terhadap efisiensi inovasi keselamatan kerja pada ruang terbatas (*confined space*) SAG Mill di site Batu Hijau, PT Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT). Mengacu pada pandangan Creswell dan Creswell (2018), sinergi metode campuran ini sangat krusial untuk menghasilkan validasi temuan yang lebih kuat dan objektif, di mana kelemahan dari satu jenis data akan dieliminasi oleh kekuatan data lainnya. Rancangan ini menggabungkan data kuantitatif hasil eksperimen fisik sirkulasi dengan data

kualitatif hasil penelusuran mendalam terhadap aspek psikologis keselamatan dan kendala prosedural di tingkat operasional tapak. Alur penelitian sekuensial eksplanatori ini dijalankan secara terstruktur melalui empat tahapan berkesinambungan: Tahap 1 berupa pengukuran data dasar (*baseline*) sistem ventilasi lama; Tahap 2 berupa perancangan dan implementasi sistem ventilasi baru; Tahap 3 berupa pengukuran eksperimen akhir (*post-test*); serta Tahap 4 berupa eksplorasi penerimaan operasional dan pelembagaan prosedur kerja aman melalui wawancara mendalam.

Rancangan ini mengevaluasi satu kelompok subjek tunggal (unit SAG Mill) dengan membandingkan performa sirkulasi udara sebelum intervensi (menggunakan sistem ventilasi *dual-venturi* lama) dan sesudah intervensi (menggunakan sistem ventilasi inovatif berbasis *axial Jet Fan* pneumatik). Berdasarkan teori metodologi dari Sugiyono (2019), rancangan ini sangat tepat digunakan dalam penelitian rekayasa terapan lapangan di mana variabel eksperimen tidak dapat dimanipulasi secara penuh, namun tetap membutuhkan pengukuran berulang yang valid.

Pendekatan kualitatif ditekankan untuk mengeksplorasi persepsi manajerial dan kepatuhan administratif pekerja terhadap pelembagaan sistem sirkulasi inovatif ke dalam dokumen perusahaan. Peneliti melakukan wawancara mendalam (*in-depth interview*) terstruktur bersama 31 informan kunci yang terlibat langsung dalam mata rantai operasional pemeliharaan. Selain wawancara, dilakukan observasi lapangan terstruktur menggunakan lembar observasi untuk mencatat dinamika perilaku keselamatan kerja, hambatan ergonomis lubang masuk (*manhole*), serta tingkat kedisiplinan kru dalam mengikuti prosedur kerja panas (*hot work*). Rincian distribusi peran, posisi jabatan, dan masa kerja dari 31 informan penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Informan Kualitatif Penelitian (N = 31)

Kelompok informan	Jumlah (n)	Posisi/jabatan	Pengalaman kerja	Fokus informasi yang digali
Pimpinan departemen	3	Maintenance Superintendent, SHE Superintendent, Mechanical Engineer	12–18 tahun	Kebijakan K3, alokasi anggaran, dan otorisasi prosedur kerja baru
Pengawas lapangan	6	Maintenance Supervisor, Safety Officer	7–11 tahun	Kepatuhan izin kerja, pengawasan penghentian pekerjaan, dan penggunaan APD
Teknisi *lancing*	12	Juru las dan pemotong logam (*lancer crew*)	4–9 tahun	Pengalaman gejala paparan gas, kondisi panas, dan ergonomi peralatan
Teknisi mekanik dan *reline*	10	Tim pembongkaran dan pemasangan *liner*	3–8 tahun	Hambatan akses *manhole*, keterbatasan ruang gerak, dan waktu pembersihan gas

Lokasi penelitian ditetapkan secara sengaja (*purposive*) di Processing Department PT AMNT, Kabupaten Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat. Pemilihan lokasi didasarkan pada karakteristik unit SAG Mill sebagai unit penggilingan primer paling kritis yang dikategorikan sebagai ruang terbatas (*confined space*) dengan tantangan aerodinamika yang sangat kompleks (Moleong, 2018). Rentang waktu pelaksanaan penelitian lapangan direncanakan berlangsung selama tiga bulan, yaitu terhitung sejak awal bulan April hingga akhir bulan Juni 2026, yang mencakup fase pengambilan data dasar (*baseline*), fase implementasi rekayasa ventilasi, hingga fase evaluasi akhir sistem.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data kualitatif dilakukan melalui teknik wawancara mendalam terstruktur bersama 31 orang informan kunci lintas divisi. Pemilihan informan didasarkan pada

kompetensi manajerial, keahlian teknis, dan kewenangan operasional hulu-hilir di PT AMNT. Informan kunci tersebut terdiri dari Maintenance Superintendent, SHE Superintendent, Mechanical Engineer, serta tim teknisi pelaksana lancing di lapangan. Pedoman wawancara dirancang secara sistematis untuk menggali informasi subjektif mengenai kendala sirkulasi eksisting, kenyamanan ergonomis alat baru, kelenturan prosedur K3, serta efisiensi waktu henti produksi (*downtime*).

Di samping wawancara, teknik pengumpulan data kualitatif juga diperkuat dengan observasi lapangan terstruktur menggunakan lembar observasi dan catatan lapangan (*field notes*) di unit SAG Mill. Peneliti ikut memantau jalannya aktivitas persiapan pengerjaan *thermic lancing*, memverifikasi kepatuhan kru terhadap prosedur LOTO (*Lockout/Tagout*), serta mencatat hambatan fisik pada lubang masuk (*manhole*). Studi dokumen sekunder juga dikumpulkan meliputi data registrasi *Confined Space Entry* (CSE), logbook historis pemeliharaan, serta draf SOP penukaran liner lama untuk memvalidasi temuan wawancara secara utuh.

Pengumpulan data kuantitatif dilakukan melalui teknik pengukuran lapangan secara langsung untuk merekam parameter fisik atmosfer kerja di dalam bejana silinder SAG Mill. Peneliti menggunakan alat pemantau gas digital (*Multi-Gas Monitor*) tipe MSA Altair 5x yang telah dikalibrasi secara ketat oleh vendor resmi keselamatan pertambangan guna mendeteksi kadar Karbon Monoksida (CO) dan Oksigen (O2). Pengukuran konsentrasi gas CO (ppm) direkam sebanyak 30 kali sesi pencatatan berjarak interval 5 menit untuk setiap fase (fase *pre-test* dan *post-test*) guna mengukur laju peluruhan konsentrasi dari puncak emisi hingga mencapai batas aman. Titik penempatan sensor pemantau gas diletakkan secara presisi pada tiga lokasi representatif di dalam SAG Mill, yaitu titik area pernapasan operator pada ketinggian 1,5 meter dari dasar mill, titik zona mati di bagian langit-langit atas pada ketinggian 4,0 meter dari dasar mill, serta titik bukaan manhole pembuangan.Untuk menjaga keabsahan eksperimen kuantitatif (*quasi-experimental control*), seluruh variabel operasional pemotongan dikendalikan secara seragam antara pengujian awal dan pengujian akhir, yang meliputi penggunaan batang lancing berdiameter seragam 12 milimeter, tekanan gas oksigen stabil pada rentang 80 hingga 90 psi, serta ketebalan pelat baja liner yang dipotong seragam sebesar 80 milimeter.

Pengukuran kecepatan aliran udara bersih dilakukan menggunakan anemometer digital pada berbagai titik penempatan di sepanjang manhole belakang (inlet) dan manhole depan (outlet). Hasil pencatatan kecepatan udara dikonversikan secara matematis untuk menghitung volume debit udara harian (m3/jam) guna menilai efektivitas pertukaran udara (*Air Changes per Hour*/ACH). Durasi pembersihan atmosfer (*purging time*) diukur secara presisi menggunakan stopwatch digital sejak aktivitas lancing dihentikan hingga sensor gas mendeteksi level di bawah 25 ppm secara konsisten.

Teknik Analisis Data

Analisis data kualitatif hasil wawancara mendalam dilakukan secara interaktif menggunakan model analisis Miles, Huberman, dan Saldana (2014) yang meliputi tiga tahapan simultan. Tahap pertama adalah kondensasi data (*data condensation*), di mana peneliti melakukan pemilihan, penyederhanaan, dan pengabstrakan transkrip wawancara dengan 31 informan kunci. Peneliti memfokuskan kode-kode kualitatif pada tema strategis rekayasa regulasi K3, pelembagaan dokumen Standard Technical Procedure (STP), program pelatihan fungsional, dan pengawasan supervisor di lapangan.

Tahap kedua adalah penyajian data (*data display*), di mana informasi yang telah dikondensasikan disajikan dalam bentuk narasi deskriptif terstruktur, bagan alur kerja sistemis, dan matriks perbandingan performa sirkulasi hulu-hilir. Penyajian data ini dirancang untuk mengorganisasikan informasi kualitatif agar hubungan timbal balik antara kendala teknis dan pemecahan manajerial dapat dipahami dengan mudah. Terakhir, tahap ketiga adalah penarikan kesimpulan (*conclusion drawing*) guna mensintesis temuan kualitatif dengan hasil rekayasa fisik, yang divalidasi melalui pengecekan kembali (*member checking*) kepada informan otoritas keselamatan perusahaan (Moleong, 2018).

Pengujian validitas kualitatif diperkokoh menggunakan teknik triangulasi sumber dan pencarian jejak audit data (*audit trail*) yang logis. Triangulasi sumber dilakukan dengan membandingkan draf usulan prosedur keselamatan baru antara keterangan Maintenance

Superintendent, SHE Superintendent, dan Mechanical Engineer di lapangan. Peneliti menyusun jejak audit yang transparan dari data mentah hingga penarikan kesimpulan melalui bimbingan akademis (Moleong, 2018). Penyelarasan ganda ini memastikan bahwa kesimpulan akhir mengenai strategi komersialisasi dan pelembagaan sistem bersifat ilmiah, netral, kredibel, dan terhindar dari bias subjektivitas peneliti.

Analisis data kuantitatif diawali dengan melakukan uji kualitas instrumen yang meliputi uji validitas dan uji reliabilitas terhadap data yang diperoleh dari 30 sesi pengukuran. Validitas instrumen dijamin melalui sertifikat kalibrasi sensor gas dan anemometer oleh vendor tersertifikasi nasional guna mengeliminasi bias teknis (Montgomery, 2017). Sementara itu, reliabilitas data diupayakan melalui strategi pengulangan pengukuran (*replication*) pada beberapa sesi lancing yang berbeda guna memastikan stabilitas pola data secara internal (Creswell & Creswell, 2018).

Selanjutnya, dilakukan pengujian asumsi klasik yang mencakup uji normalitas sebaran data sebelum melangkah pada analisis inferensial. Data konsentrasi gas CO sebanyak 30 titik pencatatan berkala diuji normalitasnya menggunakan uji Shapiro-Wilk, di mana hasil pengujian menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,214 untuk data pre-test dan 0,185 untuk data post-test ($p>0,05$), yang membuktikan bahwa seluruh data berdistribusi normal. Uji statistik inferensial diselesaikan menggunakan analisis parametrik Uji-T Berpasangan (*Paired-Samples T-Test*) guna membuktikan secara matematis bahwa perbedaan rata-rata waktu pembersihan (*purging time*) dan reduksi konsentrasi gas beracun antara sistem eksisting dengan sistem inovatif bersifat signifikan secara statistik dan bukan merupakan hasil dari variasi acak (*random variation*) di lapangan (Montgomery, 2017).

Analisis rekayasa teknik (*Engineering Analysis*) melengkapi analisis statistik dengan menghitung nilai pertukaran udara per jam melalui rumus Air Changes per Hour (ACH = Q / V), di mana Q adalah debit aliran udara (m3/jam) dan V adalah total volume internal SAG Mill (500 m). Kapasitas mekanis ventilasi dihitung secara rinci untuk memastikan kecukupan volume suplai udara bersih sesuai standar keselamatan ACGIH. Analisis Risiko (HIRARC) juga diterapkan untuk membandingkan level risiko atmosferik sebelum dan sesudah intervensi teknologi guna memberikan landasan kuantitatif terhadap efisiensi keselamatan kerja secara keseluruhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Kinerja Sistem Ventilasi Eksisting dalam Pengendalian Karbon Monoksida

Pengujian awal (*pre-test*) dilaksanakan pada 11 April 2026 untuk mengevaluasi kinerja sistem ventilasi eksisting dalam mengendalikan konsentrasi karbon monoksida (CO) selama aktivitas *thermic lancing* di dalam *Semi-Autogenous Grinding* (SAG) Mill PT Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT), Batu Hijau. Evaluasi dilakukan terhadap kapasitas aliran udara, tingkat pertukaran udara (*Air Changes per Hour*/ACH), konsentrasi CO, dan durasi pembersihan atmosfer (*purging time*). Pengujian dilaksanakan pada unit SAG Mill dengan volume internal sebesar 500 m^3.

Sistem ventilasi eksisting menggunakan satu unit *Venturi air mover* sebagai pemasok udara dengan kapasitas 2.047 m^3/jam dan dua unit *Venturi air mover* sebagai sistem pembuangan dengan kapasitas gabungan 4.094 m^3/jam. Berdasarkan kapasitas pembuangan dan volume internal SAG Mill, tingkat pertukaran udara dihitung sebesar 8,19 kali/jam. Nilai tersebut menggambarkan kapasitas pertukaran udara secara volumetrik berdasarkan data peralatan yang dilaporkan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi CO pada kondisi awal mencapai 162 ppm di area pengamatan bagian atas SAG Mill. Setelah aktivitas *thermic lancing* dihentikan dan proses *purging* berlangsung selama lima menit, konsentrasi CO menurun menjadi 85 ppm. Penurunan tersebut setara dengan 47,5% dari konsentrasi awal. Meskipun demikian, konsentrasi CO pada menit kelima masih berada di atas kriteria operasional 25 ppm yang digunakan dalam penelitian.

Pengamatan selanjutnya menunjukkan bahwa konsentrasi CO menurun hingga 20 ppm setelah proses *purging* berlangsung selama 25 menit, sebagaimana tercatat pada pukul 07.28 WITA. Konsentrasi CO mencapai pembacaan 0 ppm setelah 60 menit, yaitu pada pukul 08.03 WITA. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem ventilasi eksisting memerlukan waktu relatif

panjang untuk menurunkan konsentrasi CO setelah aktivitas pemotongan dihentikan. Kondisi ini menjadi dasar pembanding untuk mengevaluasi kinerja sistem ventilasi inovatif.

Selain hasil pengukuran, dokumen penelitian mencatat adanya keluhan pusing pada pekerja selama pelaksanaan aktivitas *thermic lancing* serta penghentian pekerjaan (*stop-work*) yang dilaporkan terjadi tiga hingga empat kali dalam satu sif. Temuan tersebut menggambarkan adanya permasalahan operasional yang berkaitan dengan pengendalian atmosfer kerja. Namun, data yang tersedia belum memungkinkan penetapan hubungan sebab-akibat secara klinis antara keluhan pekerja dan konsentrasi CO yang terukur.

Kinerja Sistem Ventilasi Inovatif dalam Mempercepat Penurunan Konsentrasi CO

Pengembangan sistem ventilasi inovatif dilakukan melalui pendekatan pengendalian rekayasa (*engineering control*) dengan meningkatkan kapasitas suplai dan pembuangan udara. Konfigurasi inovatif menggunakan *blower fan* pneumatik berkapasitas 10.000 m³/jam sebagai pemasok udara melalui *manhole* belakang dan *exhaust jet fan* berkapasitas 15.480 m³/jam sebagai sistem pembuangan melalui *manhole* depan. Penempatan kedua peralatan dirancang untuk mendukung pergerakan udara dari bagian belakang menuju bagian depan SAG Mill.

Dibandingkan konfigurasi eksisting, kapasitas suplai udara meningkat dari 2.047 menjadi 10.000 m³/jam atau sebesar 388,5%. Kapasitas pembuangan meningkat dari 4.094 menjadi 15.480 m³/jam atau sebesar 278,1%. Berdasarkan volume internal SAG Mill sebesar 500 m³, nilai ACH yang dihitung menggunakan kapasitas pembuangan meningkat dari 8,19 menjadi 30,96 kali/jam. Dengan demikian, konfigurasi inovatif menunjukkan peningkatan kapasitas pertukaran udara secara volumetrik sekitar 278%.

Pengujian akhir (*post-test*) pada 11 April 2026 menunjukkan bahwa konsentrasi awal CO mencapai 224 ppm, lebih tinggi dibandingkan konsentrasi awal pengujian sistem eksisting sebesar 162 ppm. Meskipun demikian, setelah proses *purging* berlangsung selama lima menit, konsentrasi CO menurun menjadi 17 ppm. Berdasarkan konsentrasi awal tersebut, penurunan konsentrasi CO mencapai 92,4%. Selanjutnya, pembacaan instrumen menunjukkan konsentrasi 0 ppm pada menit kesepuluh proses *purging*.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa sistem ventilasi inovatif membutuhkan waktu lima menit untuk menurunkan konsentrasi CO hingga berada di bawah kriteria operasional 25 ppm, sedangkan sistem eksisting membutuhkan waktu 25 menit. Dengan demikian, terjadi pengurangan waktu *purging* sebesar 20 menit atau 80%. Sementara itu, waktu untuk mencapai pembacaan CO sebesar 0 ppm berkurang dari 60 menit menjadi 10 menit, setara dengan pengurangan durasi sebesar 83,3%. Perbandingan parameter kinerja kedua sistem ventilasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Kinerja Sistem Ventilasi Eksisting dan Inovatif

Parameter kinerja	Sistem eksisting (*pre-test*)	Sistem inovatif (*post-test*)	Perubahan
Peralatan pemasukan udara	*Venturi air mover*	*Blower fan* pneumatik	Perubahan konfigurasi
Kapasitas pemasukan udara	2.047 m³/jam	10.000 m³/jam	Meningkat 388,5%
Peralatan pembuangan udara	Dua *Venturi air mover*	*Exhaust jet fan*	Perubahan konfigurasi
Kapasitas pembuangan udara	4.094 m³/jam	15.480 m³/jam	Meningkat 278,1%
ACH berdasarkan kapasitas pembuangan	8,19 kali/jam	30,96 kali/jam	Meningkat sekitar 278%
Konsentrasi CO awal	162 ppm	224 ppm	Berbeda 62 ppm
Konsentrasi CO menit ke-5	85 ppm	17 ppm	Lebih rendah 68 ppm pada sistem inovatif
Penurunan CO dari konsentrasi awal hingga menit ke-5	47,5%	92,4%	Selisih 44,9 poin persentase

Parameter kinerja	Sistem eksisting (*pre-test*)	Sistem inovatif (*post-test*)	Perubahan
Waktu mencapai CO ≤25 ppm	25 menit	5 menit	Berkurang 80%
Waktu mencapai pembacaan CO 0 ppm	60 menit	10 menit	Berkurang 83,3%

Secara deskriptif, hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi ventilasi inovatif menghasilkan penurunan konsentrasi CO yang lebih cepat dibandingkan sistem eksisting. Peningkatan tersebut terlihat dari konsentrasi CO yang lebih rendah pada menit kelima, peningkatan nilai ACH, dan pengurangan waktu *purging*. Namun, perbedaan konsentrasi awal pada kedua pengujian perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan besarnya peningkatan kinerja sistem.

Analisis statistik pada dokumen penelitian awal melaporkan hasil uji-t berpasangan sebesar t = 35,78 dengan nilai signifikansi yang ditulis sebagai p = 0,000. Akan tetapi, informasi mengenai struktur pasangan data, jumlah pengulangan eksperimen independen, dan distribusi selisih pengamatan belum tersedia secara lengkap. Oleh karena itu, hasil tersebut belum digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan inferensial. Evaluasi kinerja dalam penelitian ini terutama didasarkan pada perbandingan deskriptif parameter pengukuran sebelum dan sesudah intervensi.

Temuan Operasional dan Pengembangan Prosedur Keselamatan Kerja

Evaluasi sistem ventilasi inovatif juga mencakup aspek operasional dan administratif melalui pengumpulan data kualitatif yang melibatkan 31 informan. Informan terdiri atas pimpinan departemen, pengawas lapangan, teknisi *lancing*, serta teknisi mekanik dan *reline*. Pengumpulan informasi difokuskan pada keterbatasan ventilasi eksisting, pengalaman pekerja selama aktivitas pekerjaan panas, penerimaan terhadap inovasi, dan kebutuhan penguatan prosedur keselamatan.

Dokumen penelitian mengidentifikasi kebutuhan penyusunan *Standard Task Procedure* (STP) khusus untuk aktivitas *thermic lancing* yang terpisah dari prosedur umum penggantian *liner* dalam SOP CDC-PRM-000-S0106. Pengembangan STP diarahkan untuk memperjelas persyaratan pemeriksaan peralatan ventilasi, penempatan sistem pemasukan dan pembuangan udara, pemantauan konsentrasi gas, pelaksanaan *purging*, serta ketentuan penghentian dan dimulainya kembali pekerjaan.

Aspek administratif lain yang diidentifikasi meliputi penguatan *Job Safety Analysis* (JSA), *Job Hazard Analysis* (JHA), serta integrasi pelaporan hasil pemantauan gas ke dalam mekanisme izin kerja perusahaan. Dokumen awal juga mencantumkan penggunaan sistem pelaporan digital, antara lain *Authority to Work* (ATW), *Supervisor Daily Inspection Card* (SDIC), dan *Fatal Risk Management* (FRM), sebagai bagian dari penguatan pengawasan keselamatan.

Selain itu, evaluasi operasional menunjukkan perlunya menjaga kestabilan tekanan suplai udara kompresor sesuai spesifikasi peralatan, memastikan ketersediaan instrumen pemantauan gas, serta meningkatkan pengawasan pelaksanaan prosedur kerja. Aspek tersebut menjadi dasar penyusunan rekomendasi untuk mendukung penerapan sistem ventilasi inovatif secara konsisten.

Data yang tersedia belum menyajikan ringkasan tematik wawancara, kutipan langsung informan, ataupun dokumentasi formal pengesahan STP baru. Oleh karena itu, hasil kualitatif pada tahap ini menggambarkan kebutuhan penguatan prosedur keselamatan dan arah pengembangan implementasi inovasi, bukan bukti kuantitatif keberhasilan penerapan seluruh perubahan administratif.

Pembahasan

Keterbatasan Sistem Ventilasi Eksisting dalam Pengendalian Karbon Monoksida

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ventilasi eksisting memiliki keterbatasan dalam menurunkan konsentrasi karbon monoksida (CO) setelah aktivitas *thermic lancing* dihentikan. Meskipun kapasitas pertukaran udara yang dihitung berdasarkan kapasitas pembuangan mencapai 8,19 kali/jam, konsentrasi CO pada menit kelima proses *purging*

masih tercatat sebesar 85 ppm dari konsentrasi awal 162 ppm. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas pertukaran udara secara volumetrik belum sepenuhnya menggambarkan kemampuan sistem dalam mengendalikan kontaminan. Fisk et al. (1997) menjelaskan bahwa efektivitas pertukaran udara dan pembuangan polutan dapat berbeda akibat variasi pencampuran serta distribusi udara di dalam ruang. Oleh karena itu, evaluasi ventilasi pada SAG Mill perlu mempertimbangkan perubahan konsentrasi CO secara aktual, bukan hanya kapasitas aliran udara nominal.

Karakteristik geometris SAG Mill sebagai ruang berbentuk silinder dengan akses terbatas melalui *manhole* berpotensi memengaruhi distribusi aliran udara dan pembentukan zona pertukaran udara rendah (*dead-air zones*). Cheng et al. (2024) dan Hwan et al. (2021) membahas keterkaitan karakteristik aliran udara dengan efektivitas pengendalian kontaminan pada ruang terbatas. Pavelchak et al. (2002) juga menunjukkan bahwa debit ventilasi tidak selalu mencerminkan laju ventilasi efektif karena dipengaruhi pencampuran udara. Dalam penelitian ini, keterbatasan ventilasi eksisting terlihat dari lamanya waktu yang diperlukan untuk menurunkan konsentrasi CO, tetapi belum tersedia pengukuran tekanan statis maupun distribusi aliran secara spasial. Oleh karena itu, rendahnya tekanan statis pada peralatan *Venturi air mover* belum dapat ditetapkan sebagai penyebab utama keterbatasan sistem.

Pedoman *Industrial Ventilation* dari ACGIH (2023) menekankan pentingnya penyesuaian desain ventilasi dengan karakteristik sumber kontaminan dan pola distribusi udara. Hal ini sejalan dengan penelitian Jankovic et al. (1996), yang menggunakan perubahan konsentrasi gas terhadap waktu untuk mengevaluasi karakteristik ventilasi pengenceran. Pada ruang terbatas dengan aktivitas pekerjaan panas, peningkatan debit udara perlu disertai pengaturan jalur pemasukan dan pembuangan agar kontaminan dapat dipindahkan secara efektif dari area kerja. Dengan demikian, penggunaan nilai ACH sebagai indikator kapasitas pertukaran udara perlu dilengkapi dengan evaluasi konsentrasi gas pada lokasi yang relevan.

Durasi *purging* selama 25 menit untuk menurunkan konsentrasi CO hingga berada di bawah kriteria operasional 25 ppm menunjukkan bahwa sistem eksisting masih memerlukan perbaikan kinerja. Waktu tunggu tersebut berpotensi memengaruhi kesinambungan kegiatan pemeliharaan karena pekerjaan tidak dapat dilanjutkan sebelum kondisi atmosfer memenuhi persyaratan keselamatan. Rose et al. (2017) menjelaskan bahwa CO dapat mengganggu pengangkutan oksigen dan respirasi seluler serta menimbulkan gangguan neurologis maupun kardiovaskular. Oleh karena itu, percepatan penurunan konsentrasi CO menjadi aspek penting dalam pengendalian bahaya atmosfer. Namun, batas 25 ppm yang digunakan sebagai indikator penelitian tidak boleh ditafsirkan sebagai jaminan bahwa kondisi atmosfer sepenuhnya aman untuk memasuki ruang terbatas tanpa evaluasi kadar oksigen dan kontaminan lainnya.

Keterbatasan ventilasi eksisting juga menunjukkan pentingnya kemampuan organisasi dalam mengembangkan solusi teknis berdasarkan karakteristik risiko operasional. Schilling (2020) menekankan bahwa kapabilitas teknologi mencakup kemampuan organisasi untuk mengembangkan dan menerapkan perubahan teknis guna meningkatkan kinerja. Cooper et al. (2020) juga digunakan sebagai landasan pembahasan mengenai hubungan antara kapabilitas teknologi dan pengendalian bahaya pada industri berisiko tinggi. Dalam penelitian ini, modifikasi ventilasi merupakan respons terhadap kebutuhan peningkatan efektivitas pengendalian atmosfer. Pendekatan tersebut sesuai dengan prinsip hierarki pengendalian bahaya NIOSH (2024), yang menempatkan pengendalian rekayasa di atas pengendalian administratif dan penggunaan alat pelindung diri.

Efektivitas Sistem Ventilasi Inovatif terhadap Penurunan Konsentrasi CO

Penerapan sistem ventilasi inovatif menunjukkan peningkatan kapasitas pertukaran udara yang disertai percepatan penurunan konsentrasi CO selama proses *purging*. Nilai ACH yang dihitung berdasarkan kapasitas pembuangan meningkat dari 8,19 menjadi 30,96 kali/jam, sedangkan durasi penurunan konsentrasi CO hingga mencapai kriteria operasional ≤25 ppm berkurang dari 25 menjadi 5 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi inovatif memiliki kinerja pembersihan atmosfer yang lebih baik pada kondisi pengujian yang dilaporkan. Fisk et al. (1997) menekankan bahwa evaluasi ventilasi perlu menghubungkan pertukaran udara dengan efektivitas pembuangan kontaminan. Dengan demikian,

peningkatan ACH dalam penelitian ini menjadi lebih bermakna ketika dianalisis bersama penurunan konsentrasi CO dan waktu *purging*.

Peningkatan kapasitas aliran udara berpotensi mempercepat pengenceran dan pengangkutan kontaminan keluar dari SAG Mill. Namun, efektivitas sistem juga dipengaruhi pola distribusi aliran udara, posisi sumber emisi, dan kemungkinan terbentuknya zona pencampuran yang kurang efektif. Li et al. (2021), Zhang et al. (2020), dan Turner et al. (2022) digunakan sebagai landasan pembahasan mengenai pentingnya pengaturan distribusi udara pada ruang industri tertutup. Alkhalaf et al. (2023) melalui pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukkan bahwa konfigurasi ventilasi dan posisi komponen distribusi udara berpengaruh terhadap pembuangan kontaminan. Walaupun penelitian tersebut dilakukan pada ruang rumah sakit yang memiliki karakteristik berbeda dari SAG Mill, prinsip pengaruh geometri ruang dan konfigurasi ventilasi tetap relevan sebagai dasar interpretasi.

Konfigurasi sistem inovatif menggunakan *blower fan* pneumatik berkapasitas 10.000 m³/jam sebagai pemasok udara dan *exhaust jet fan* berkapasitas 15.480 m³/jam sebagai sistem pembuangan. Kapasitas pembuangan yang lebih besar daripada kapasitas suplai secara konseptual dapat mendukung pembentukan tekanan negatif apabila tersedia jalur udara pengganti yang sesuai. Baker dan White (2024) digunakan sebagai landasan teoretis mengenai penerapan ventilasi tekanan negatif pada ruang berbahaya. Pavelchak et al. (2002) juga menunjukkan bahwa efektivitas ventilasi ruang bertekanan negatif dipengaruhi oleh karakteristik pencampuran udara. Meskipun demikian, penelitian ini belum melaporkan pengukuran perbedaan tekanan antara bagian dalam dan luar SAG Mill sehingga keberadaan tekanan negatif belum dapat dinyatakan sebagai hasil yang terverifikasi.

Penempatan saluran pemasukan udara pada *manhole* belakang dan saluran pembuangan pada *manhole* depan dirancang untuk mendukung pergerakan udara sepanjang ruang SAG Mill. Secara teoretis, pengaturan jalur aliran dapat meningkatkan kemampuan ventilasi dalam membawa kontaminan menuju saluran pembuangan. Jankovic et al. (1996) menjelaskan bahwa pola penurunan konsentrasi gas dapat digunakan untuk menilai efektivitas ventilasi pengenceran, sedangkan Alkhalaf et al. (2023) menekankan pentingnya konfigurasi distribusi udara dalam pengendalian kontaminan. Namun, penelitian ini belum menyajikan pemetaan distribusi kecepatan udara secara spasial maupun simulasi CFD untuk memastikan penghilangan seluruh zona pertukaran udara rendah. Oleh karena itu, keunggulan konfigurasi inovatif lebih tepat disimpulkan berdasarkan perubahan konsentrasi CO yang terukur dan pengurangan durasi *purging*.

Penurunan konsentrasi CO dari 224 ppm menjadi 17 ppm dalam lima menit menunjukkan reduksi sebesar 92,4%. Persentase tersebut menggambarkan penurunan konsentrasi pada titik dan waktu pengamatan yang dilaporkan, bukan efisiensi penangkapan kontaminan secara keseluruhan. Perbedaan konsentrasi awal antara sistem eksisting sebesar 162 ppm dan sistem inovatif sebesar 224 ppm juga perlu diperhatikan dalam membandingkan kinerja kedua konfigurasi. Pavelchak et al. (2002) menekankan pentingnya evaluasi laju penurunan kontaminan untuk menggambarkan ventilasi efektif. Oleh karena itu, pengujian berulang dengan kondisi awal yang lebih terkendali diperlukan untuk memastikan konsistensi kinerja sistem ventilasi inovatif.

Hasil pengujian statistik dalam naskah awal melaporkan nilai t = 35,78 dengan p = 0,000. Namun, interpretasi signifikansi statistik memerlukan pemeriksaan terhadap pasangan data, independensi pengamatan, dan distribusi selisih yang digunakan dalam uji-t berpasangan. Pengukuran berulang pada interval waktu tertentu dapat menunjukkan keterkaitan temporal sehingga tidak secara otomatis memenuhi asumsi independensi. Montgomery (2017) menekankan pentingnya kesesuaian rancangan eksperimen dengan prosedur analisis statistik. Oleh karena itu, hasil inferensial tersebut perlu diverifikasi berdasarkan data mentah sebelum digunakan untuk menyimpulkan signifikansi perbedaan kinerja sistem. Berdasarkan data yang tersedia, penelitian ini menunjukkan peningkatan kinerja secara deskriptif melalui peningkatan ACH dan pengurangan waktu *purging*.

Penggunaan teknologi pneumatik merupakan karakteristik tambahan sistem ventilasi inovatif. Peralatan pneumatik berpotensi mengurangi kebutuhan penggunaan motor listrik langsung pada area kerja. Namun, penggunaan energi pneumatik tidak secara otomatis menjamin bahwa sistem memenuhi klasifikasi *explosion-proof* atau bebas dari semua sumber penyalaan. NFPA 496 (2021) dapat digunakan sebagai rujukan mengenai perlindungan

peralatan tertentu melalui pengaturan tekanan dan pembersihan atmosfer, tetapi kesesuaiannya harus dievaluasi berdasarkan spesifikasi peralatan dan klasifikasi bahaya aktual. Dengan demikian, penggunaan sistem pneumatik tetap memerlukan pemeriksaan keselamatan yang menyeluruh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi konfigurasi ventilasi berpotensi meningkatkan efektivitas pengendalian CO pada aktivitas *thermic lancing* di dalam SAG Mill. Peningkatan kapasitas pertukaran udara diikuti oleh penurunan konsentrasi CO dan durasi *purging* yang lebih singkat. Temuan ini memperkuat pentingnya integrasi kapasitas teknis peralatan dengan pengetahuan operasional pekerja dalam pengembangan inovasi keselamatan (Pratomo, 2024; Aditama, 2020; Turner et al., 2022). Namun, penerapan konfigurasi tersebut pada ruang terbatas dengan karakteristik berbeda memerlukan pengujian tambahan untuk memastikan kesesuaian kapasitas dan pola distribusi udara.

Integrasi Inovasi Ventilasi ke dalam Prosedur Keselamatan Kerja

Keberhasilan pengembangan sistem ventilasi tidak hanya bergantung pada peningkatan kapasitas teknis, tetapi juga pada kemampuan organisasi untuk mengintegrasikan inovasi ke dalam prosedur keselamatan operasional. Pada aktivitas *thermic lancing*, pengendalian risiko atmosfer memerlukan keterpaduan antara kesiapan peralatan, pemantauan gas, pengawasan pekerjaan, kompetensi pekerja, dan prosedur penghentian kegiatan apabila kondisi tidak memenuhi persyaratan keselamatan. NIOSH (2024) menempatkan pengendalian rekayasa dalam hierarki pengendalian bahaya sebagai upaya yang lebih diutamakan daripada pengendalian administratif dan alat pelindung diri. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas ventilasi harus didukung mekanisme pengawasan dan prosedur yang memastikan pengendalian tersebut berfungsi secara konsisten.

Salah satu kebutuhan yang diidentifikasi dalam penelitian adalah penyusunan *Standard Task Procedure* (STP) khusus aktivitas *thermic lancing* yang terpisah dari SOP umum penggantian *liner*. Prosedur tersebut dapat mencakup persiapan pekerjaan, pemeriksaan kesiapan ventilasi, penempatan saluran pemasukan dan pembuangan udara, pengujian atmosfer, pengaturan proses *purging*, serta persyaratan penghentian dan dimulainya kembali pekerjaan. Prinsip ini sejalan dengan OSHA 29 CFR 1910.146 yang menekankan identifikasi bahaya atmosfer, pengujian kondisi ruang, pengendalian bahaya, dan penerapan prosedur izin kerja selama aktivitas di ruang terbatas. Standardisasi prosedur yang lebih spesifik diharapkan dapat meningkatkan konsistensi penerapan pengendalian terhadap risiko paparan CO.

Pengembangan STP juga dapat diperkuat melalui penerapan pendekatan pertahanan berlapis sebagaimana dijelaskan dalam *Swiss Cheese Model* oleh Reason (2016). Model tersebut menunjukkan bahwa kecelakaan dapat terjadi ketika sejumlah kelemahan pada lapisan pengendalian saling berinteraksi. Dalam penelitian ini, ventilasi inovatif berperan sebagai pengendalian rekayasa, sedangkan STP, *Job Safety Analysis* (JSA), *Job Hazard Analysis* (JHA), pemantauan gas, dan izin kerja merupakan pengendalian administratif yang saling melengkapi. Integrasi beberapa lapisan pengendalian tersebut berpotensi memperkuat kemampuan organisasi dalam mengantisipasi kondisi atmosfer berbahaya selama pemeliharaan SAG Mill.

Penerapan konfigurasi ventilasi inovatif juga membutuhkan kompetensi pekerja yang memadai. Program pelatihan perlu mencakup pengenalan bahaya CO, pemeriksaan kesiapan sistem ventilasi, pengoperasian peralatan pneumatik, pemantauan konsentrasi gas, serta prosedur penanganan kondisi tidak aman. Rose et al. (2017) menjelaskan bahwa CO dapat menyebabkan gangguan fisiologis serius akibat pengaruhnya terhadap pengangkutan oksigen dan respirasi seluler. Oleh karena itu, peningkatan pengetahuan pekerja mengenai bahaya CO penting untuk mendukung pengambilan keputusan yang tepat selama pekerjaan panas. Selain itu, pemeriksaan tekanan suplai udara dan kesiapan instrumen gas perlu menjadi bagian dari kegiatan pengawasan sebelum dan selama pekerjaan berlangsung.

Tidd dan Bessant (2020) menekankan bahwa keberhasilan inovasi teknologi dipengaruhi kemampuan organisasi untuk mengintegrasikan perubahan teknis dengan proses pembelajaran dan pengelolaan operasional. Fauzi (2022) juga digunakan sebagai landasan pembahasan mengenai pentingnya penguatan sistem manajemen K3 berbasis teknologi

dalam industri pertambangan. Dalam konteks penelitian ini, kedua perspektif tersebut menunjukkan bahwa manfaat ventilasi inovatif berpotensi dipertahankan apabila didukung prosedur terdokumentasi, pelatihan berkala, pengawasan operasional, dan pemeliharaan peralatan. NIOSH (2024) juga menekankan pentingnya evaluasi efektivitas pengendalian secara berkelanjutan untuk memastikan bahwa tindakan pengurangan risiko tetap sesuai dengan perubahan kondisi pekerjaan.

Penggunaan sistem pelaporan keselamatan digital dan pengelolaan inventori suku cadang dapat menjadi bagian dari strategi penguatan implementasi inovasi. Sistem pelaporan digital memungkinkan pencatatan pemeriksaan ventilasi dan pemantauan gas secara lebih sistematis, sedangkan pengelolaan inventori mendukung kesiapan peralatan selama kegiatan pemeliharaan. Namun, penelitian ini belum menyajikan hasil evaluasi kuantitatif mengenai pengurangan *downtime* tahunan, efisiensi biaya, peningkatan kepatuhan prosedur, maupun perubahan angka kecelakaan kerja setelah penerapan inovasi. Oleh karena itu, manfaat tersebut perlu diposisikan sebagai implikasi potensial yang membutuhkan pembuktian melalui penelitian lanjutan.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan dan evaluasi lapangan konfigurasi ventilasi mekanis untuk meningkatkan pengendalian CO selama aktivitas *thermic lancing* di dalam SAG Mill. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas pertukaran udara serta percepatan penurunan konsentrasi CO setelah modifikasi sistem. Sementara itu, evaluasi operasional memberikan dasar bagi penguatan prosedur keselamatan yang lebih spesifik terhadap karakteristik pekerjaan panas di ruang terbatas. Integrasi pengendalian rekayasa dan penguatan prosedur operasional tersebut dapat dikembangkan sebagai pendekatan keselamatan berbasis bukti pada aktivitas pemeliharaan industri pertambangan. Penelitian selanjutnya perlu memvalidasi konsistensi kinerja melalui pengujian berulang, pengukuran distribusi udara secara spasial, dan evaluasi efektivitas implementasi STP. Pendekatan tersebut dapat diperkuat melalui pengukuran laju penurunan kontaminan sebagaimana digunakan oleh Jankovic et al. (1996) dan Pavelchak et al. (2002), serta pemodelan CFD untuk mengevaluasi konfigurasi ventilasi yang lebih optimal (Alkhalaf et al., 2023).

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem ventilasi eksisting pada SAG Mill PT Amman Mineral Nusa Tenggara (AMNT) memiliki keterbatasan dalam mempercepat pembersihan karbon monoksida (CO) setelah aktivitas *thermic lancing*. Sistem tersebut menggunakan kapasitas pembuangan udara sebesar 4.094 m³/jam dengan tingkat pertukaran udara (*Air Changes per Hour*/ACH) nominal sebesar 8,19 kali/jam. Meskipun telah menyediakan pertukaran udara secara mekanis, sistem eksisting membutuhkan waktu 25 menit untuk menurunkan konsentrasi CO hingga mencapai kriteria operasional ≤25 ppm dan 60 menit hingga instrumen menunjukkan pembacaan 0 ppm. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya peningkatan efektivitas ventilasi untuk mengurangi waktu tunggu *purging* dan mendukung kesinambungan aktivitas pemeliharaan. Nilai ACH tersebut tidak dapat digunakan secara tunggal untuk menyimpulkan kecukupan ventilasi bagi pekerjaan panas di ruang terbatas tanpa mempertimbangkan tingkat emisi dan distribusi kontaminan.

Penerapan konfigurasi ventilasi inovatif berbasis pengendalian rekayasa (*engineering control*) menunjukkan peningkatan kinerja secara deskriptif. Penggunaan *blower fan* pneumatik berkapasitas 10.000 m³/jam sebagai pemasok udara dan *exhaust jet fan* berkapasitas 15.480 m³/jam sebagai sistem pembuangan meningkatkan ACH nominal dari 8,19 menjadi 30,96 kali/jam atau sekitar 278%. Pada pengujian sistem inovatif, konsentrasi CO menurun dari 224 ppm menjadi 17 ppm dalam lima menit, setara dengan penurunan sebesar 92,4%. Waktu untuk mencapai konsentrasi CO ≤25 ppm berkurang dari 25 menjadi 5 menit (80%), sedangkan waktu untuk memperoleh pembacaan 0 ppm berkurang dari 60 menjadi 10 menit (83,3%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi inovatif berpotensi meningkatkan efektivitas pembersihan atmosfer selama aktivitas *thermic lancing*. Namun, klaim signifikansi statistik masih memerlukan verifikasi terhadap struktur pasangan data dan jumlah pengulangan eksperimen independen.

Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan konfigurasi ventilasi dengan peningkatan kapasitas pemasukan dan pembuangan udara sebagai alternatif pengendalian rekayasa untuk mempercepat penurunan konsentrasi CO di dalam SAG Mill. Temuan tersebut

juga memberikan dasar teknis bagi penguatan *Standard Task Procedure* (STP), khususnya mengenai pemeriksaan kesiapan ventilasi, pemantauan atmosfer, pelaksanaan *purging*, serta prosedur penghentian dan dimulainya kembali pekerjaan. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena pengujian dilakukan pada satu unit SAG Mill berkapasitas 500 m³, dengan konsentrasi awal CO yang berbeda antara kedua konfigurasi dan data distribusi udara yang belum lengkap. Oleh karena itu, validasi melalui pengujian berulang dan evaluasi kinerja pada ruang terbatas dengan dimensi serta karakteristik geometris berbeda diperlukan sebelum hasilnya diterapkan secara lebih luas.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian, Departemen Maintenance PT AMNT disarankan untuk menerapkan pemeriksaan kesiapan sistem ventilasi sebelum aktivitas *thermic lancing*, termasuk memastikan kapasitas aliran udara, kondisi peralatan, dan kestabilan tekanan suplai kompresor sesuai spesifikasi operasi yang dipersyaratkan. Rentang tekanan 80–90 psi yang digunakan selama pengujian dapat menjadi parameter evaluasi operasional, tetapi penetapan batas minimum dalam STP harus mengacu pada spesifikasi teknis peralatan dan hasil verifikasi lapangan. Instrumen pendeteksi gas personal maupun area perlu menjalani pemeriksaan fungsi dan kalibrasi secara berkala sesuai ketentuan produsen. Pemantauan atmosfer harus mencakup konsentrasi CO, kadar oksigen, dan kontaminan relevan lainnya sehingga keputusan memasuki atau melanjutkan pekerjaan tidak hanya bergantung pada pencapaian konsentrasi CO ≤25 ppm.

Departemen keselamatan dan pengelola pemeliharaan direkomendasikan untuk memfinalisasi dan mengesahkan STP khusus aktivitas *thermic lancing* yang mengintegrasikan konfigurasi ventilasi inovatif, prosedur *purging*, pengujian atmosfer, serta kewenangan penghentian pekerjaan. Prosedur tersebut perlu diselaraskan dengan *Job Safety Analysis* (JSA), *Job Hazard Analysis* (JHA), dan mekanisme izin masuk ruang terbatas. Pelatihan penyegaran juga perlu dilaksanakan untuk meningkatkan kompetensi pekerja dalam mengoperasikan sistem ventilasi pneumatik, mengenali bahaya CO, membaca hasil pemantauan gas, serta merespons kegagalan ventilasi. Efektivitas implementasi STP sebaiknya dievaluasi melalui audit kepatuhan, catatan pengukuran atmosfer, dan dokumentasi kejadian *stop-work*.

Untuk mendukung keandalan operasional, manajemen perusahaan disarankan mengintegrasikan kebutuhan suku cadang kritis sistem ventilasi dan instrumen pendeteksi gas ke dalam pengelolaan inventori berbasis SAP. Penentuan stok pengaman perlu mempertimbangkan tingkat penggunaan, keandalan peralatan, waktu tunggu pengadaan, dan konsekuensi operasional apabila peralatan tidak tersedia. Pendekatan ini diharapkan dapat mendukung kesiapan sistem ventilasi selama kegiatan pemeliharaan, meskipun besarnya penghematan biaya dan pengurangan *downtime* masih memerlukan evaluasi kuantitatif tersendiri.

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian berulang pada beberapa siklus *thermic lancing* dengan kondisi operasional yang lebih terstandar serta menggunakan debit udara aktual hasil pengukuran untuk menentukan ACH. Pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dapat dikembangkan untuk mengevaluasi pola aliran, distribusi CO, dan potensi terbentuknya zona pertukaran udara rendah pada berbagai konfigurasi *inlet* dan *outlet*. Selain itu, integrasi sensor gas dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dapat diteliti untuk mendukung pemantauan atmosfer secara waktu nyata dan sistem peringatan dini. Kajian ergonomi dan kenyamanan termal pekerja juga perlu dilakukan untuk menilai manfaat inovasi secara lebih menyeluruh, sedangkan evaluasi sebaran CO pada titik pembuangan diperlukan untuk memastikan bahwa pengendalian paparan di dalam SAG Mill tidak menimbulkan risiko yang tidak terkendali di area sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

Aditama, F. (2020). Inovasi inkremental dan efisiensi sistem pada sektor manufaktur berat. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 15*(2), 210–225.

Alkhalaf, M., Ilinca, A., & Hayyani, M. Y. (2023). CFD investigation of ventilation strategies to remove contaminants from a hospital room. *Designs, 7*(1), Article 5. https://doi.org/10.3390/designs7010005

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2023). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design* (31st ed.). ACGIH.

Baker, T. R., & White, L. M. (2024). Fluid dynamics of negative pressure ventilation in hazardous confined spaces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 21*(2), 112–125.

Beloglazov, I., & Plaschinsky, V. (2024). Development MPC for the grinding process in SAG mills using DEM investigations on liner wear. *Materials, 17*(4), Article 795. https://doi.org/10.3390/ma17040795

Cheng, Y., Zhang, H., & Liu, X. (2024). Computational fluid dynamics (CFD) simulation of toxic gas stratification and thermal buoyancy in cylindrical confined spaces. *Process Safety and Environmental Protection, 182*, 455–468.

Cigweld. (2025). *Thermal lancing equipment: Safe operating manual and high-temperature cutting specifications*. Cigweld Industrial Publications.

Cooper, D., Phillips, M., & Evans, R. (2020). Technological capability and hazard barriers in high-risk mineral processing plants. *Process Safety and Environmental Protection, 141*, 310–322.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.

Fauzi, A. (2022). Resiliensi industri pertambangan melalui penguatan sistem manajemen K3 berbasis teknologi. *Jurnal Ekonomi dan Industri, 15*(2), 110–125.

Fisk, W. J., Faulkner, D., Sullivan, D. P., & Bauman, F. S. (1997). Air change effectiveness and pollutant removal efficiency during adverse mixing conditions. *Indoor Air, 7*(1), 55–63. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.t01-3-00007.x

Hwan, K., Lee, S., & Park, J. (2021). Aerodynamic limitations of venturi-type air movers in confined space toxic fume evacuation. *Safety and Health at Work, 12*(3), 341–349.

Jankovic, J. T., Ihle, R., & Vick, D. O. (1996). Occupant generated carbon dioxide as a measure of dilution ventilation efficiency. *American Industrial Hygiene Association Journal, 57*(8), 756–759. https://doi.org/10.1080/15428119691014639

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 tentang keselamatan dan kesehatan kerja lingkungan kerja*. https://jdih.kemnaker.go.id/peraturan/detail/1546/peraturan-menteri%20nomor-5-tahun-2018

Li, X., Wang, Y., & Zhang, J. (2021). Optimization of local exhaust ventilation systems in deep underground spaces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 18*(6), 254–267.

Li, Z., Chen, L., Aldrich, C., Zanin, M., & Asamoah, R. (2026). A review of the AG/SAG mill liner health monitoring systems. *Minerals Engineering, 235*, Article 109832. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109832

Mardatilla, A. (2021). Evaluasi kinerja sirkuit grinding dan kominusi pada industri pengolahan mineral tembaga. *Jurnal Rekayasa Pertambangan, 12*(3), 145–158. https://doi.org/10.31284/j.jrp.2021.v12i3.1890

Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.

Moleong, L. J. (2018). *Metodologi penelitian kualitatif* (edisi revisi). PT Remaja Rosdakarya.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.

National Fire Protection Association. (2021). *Standard for purged and pressurized enclosures for electrical equipment* (NFPA 496).

National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). *NIOSH pocket guide to chemical hazards: Carbon monoxide*. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0105.html

National Institute for Occupational Safety and Health. (2024). *Hierarchy of controls*. Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/about/

Nugroho, A. (2024). Implementasi rekayasa keselamatan kerja berbasis smart mining pada industri pertambangan tembaga. *Jurnal Keselamatan Pertambangan, 6*(1), 45–58. https://doi.org/10.31284/jkp.2024.v6i1.2109

Nurhadi, F. (2021). Pengendalian bahaya gas karbon monoksida pada ruang terbatas industri pertambangan. *Jurnal Keselamatan Transportasi dan Industri, 8*(2), 85–96. https://doi.org/10.35134/jkti.v8i2.42

OSHA. (2015). *Permit-required confined spaces standard (29 CFR 1910.146)*. Occupational Safety and Health Administration, United States Department of Labor.

Pavelchak, N., Palmer, W., DePersis, R. P., & London, M. A. (2002). A simple and inexpensive method for determining the effective ventilation rate in a negatively pressurized room using airborne particles as a tracer. *Applied Occupational and Environmental Hygiene, 17*(10), 704–710. https://doi.org/10.1080/10473220290096195

Pural, Y. E., Ledezma, T., Hilden, M., Forbes, G., Boylu, F., & Yahyaei, M. (2024). Application of machine learning for generic mill liner wear prediction in semi-autogenous grinding (SAG) mills. *Minerals, 14*(12), Article 1200. https://doi.org/10.3390/min14121200

Reason, J. (2016). *Organizational accidents revisited*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315599359

Rose, J. J., Wang, L., Xu, Q., McTiernan, C. F., Shiva, S., Tejero, J., & Gladwin, M. T. (2017). Carbon monoxide poisoning: Pathogenesis, management, and future directions of therapy. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 195*(5), 596–606. https://doi.org/10.1164/rccm.201606-1275CI

Schilling, M. A. (2020). *Strategic management of technological innovation* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Setiawan, D. (2019). Manajemen pemeliharaan komponen liner SAG Mill pada proses pengolahan konsentrat bijih emas. *Jurnal Teknologi Pertambangan, 10*(1), 50–62. https://doi.org/10.31315/jtp.v10i1.3012

Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.

Tidd, J., & Bessant, J. (2020). *Managing innovation: Integrating technological, market and organizational change* (7th ed.). John Wiley & Sons.

Turner, S., Jones, D., & Popendorf, W. (2022). Evaluation of mechanical ventilation efficiency and air distribution in enclosed industrial structures. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 19*(4), 215–228.

Zhang, L., He, X., & Liu, B. (2020). Dispersion characteristics of toxic gas in confined space during hot work. *Process Safety and Environmental Protection, 136*, 120–131.