

INTEGRASI SISTEM PENYANGGAAN MEKANIS DAN MANAJEMEN
VENTILASI JARINGAN DALAM MENJAMIN KESELAMATAN SERTA
KESTABILAN TAMBANG BATUBARA BAWAH TANAH BMK 36

Ariel Salman Alvarisi¹, Raihan Alnezon², Hendriono³, Suci Fitria Rahmadhani Z^{4*},
Nofrohu Retongga⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Pertambangan, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang, Jl.
Hamka No. 1, Padang, Indonesia

Corresponding Author: sucifitria1228@gmail.com

Abstract. *Underground coal mining activities have a high risk of roof collapse and accumulation of hazardous gases that can threaten worker safety. This study aims to evaluate the effectiveness of the support system and optimize the ventilation network in the active production pit BMK 36 CV. Bara Mitra Kencana, Sawahlunto. The novelty of this study lies in the integrative approach that examines geotechnical and ventilation aspects simultaneously as an effort to control underground mining risks. The research method was carried out quantitatively through field measurements of rock mass conditions, support systems, air flow, and mine air quality. The results showed that roof stability was controlled using three-piece wooden supports with a diameter of 18–22 cm and reinforced concrete in the critical zone. Ventilation evaluation showed that the actual air flow of 155 m³/minute did not meet the air requirements based on the number of workers and operating equipment. This condition is influenced by flow resistance due to the tunnel geometry and leaks at the ducting joints. Recommended remedial measures include the use of standardized support materials, reducing the distance between supports to a maximum of 1.0 m in weak zones, improving ducting joints, and increasing blower fan capacity. Integrating support and ventilation evaluations has been shown to improve geotechnical and atmospheric risk control in the mine, thus supporting a safer and more productive work environment.*

Keywords: *underground mining, support, mine ventilation, occupational safety, roof fall.*

Abstrak. Kegiatan penambangan batubara bawah tanah memiliki risiko tinggi terhadap keruntuhan atap (*roof fall*) dan akumulasi gas berbahaya yang dapat mengancam keselamatan pekerja. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas sistem penyanggaan dan mengoptimalkan jaringan ventilasi pada lubang produksi aktif BMK 36 CV. Bara Mitra Kencana, Sawahlunto. Kebaruan penelitian terletak pada pendekatan integratif yang mengkaji aspek geoteknik dan ventilasi secara bersamaan sebagai upaya pengendalian risiko tambang bawah tanah. Metode penelitian dilakukan secara kuantitatif melalui pengukuran lapangan terhadap kondisi massa batuan, sistem penyangga, debit udara, dan kualitas udara tambang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas atap dikendalikan menggunakan penyangga kayu *three pieces set* berdiameter 18–22 cm dan beton bertulang pada zona kritis. Evaluasi ventilasi menunjukkan debit udara aktual sebesar 155 m³/menit belum memenuhi kebutuhan udara berdasarkan jumlah pekerja dan peralatan yang beroperasi. Kondisi ini dipengaruhi oleh resistansi aliran akibat geometri lorong dan kebocoran pada sambungan ducting. Upaya perbaikan yang direkomendasikan meliputi penggunaan material penyangga yang memenuhi standar, pengurangan jarak antarpengangga menjadi maksimal 1,0 m pada zona lemah, perbaikan sambungan ducting, dan peningkatan kapasitas blower fan. Integrasi evaluasi penyanggaan dan

ventilasi terbukti mampu meningkatkan pengendalian risiko geoteknik dan atmosfer tambang sehingga mendukung terciptanya lingkungan kerja yang lebih aman dan produktif.

Katakunci: *tambang bawah tanah, penyanggaan, ventilasi tambang, keselamatan kerja, roof fall.*

Pendahuluan

Kegiatan penambangan batubara bawah tanah (*underground mining*) merupakan salah satu teknik pemanfaatan sumber daya mineral ekonomis penting yang dilakukan dengan cara membuat akses lubang bukaan horizontal, miring, maupun vertikal di bawah permukaan bumi untuk mengambil cadangan komoditas batubara. Dibandingkan dengan metode tambang terbuka (*surface mining*), pengerjaan tambang dalam memiliki tingkat kompleksitas keteknikan dan risiko operasional yang jauh lebih tinggi. Kompleksitas ini dipicu utamanya oleh redistribusi regangan dan tegangan pada massa batuan sekitar setelah proses penggalian batubara atau pembongkaran kemajuan terowongan berlangsung [1].

Sistem penyangga terowongan (*ground support system*) memegang peranan krusial sebagai garda terdepan penopang beban struktural batuan pelapis untuk menjaga kestabilan lubang terowongan agar tetap aman dan kokoh selama umur pakai operasional tambang [2]. Dalam operasi tambang bawah tanah konvensional hingga semimekanis, variasi jenis penyangga yang umum diterapkan meliputi penyangga pasif elastis (seperti tiang kayu dan baja H-beam/I-beam) maupun penyangga aktif penambah kekuatan massa batuan *self-supporting* (seperti *rock bolt*, *shotcrete*, maupun kabel angkur).

Pemilihan tipe, spesifikasi dimensi material, tingkat kerapatan jarak pasang, dan konfigurasi geometri penyangga wajib didasarkan pada perhitungan

kuantitatif matang yang mengintegrasikan parameter kelas massa batuan (*Rock Mass Rating*), kedalaman penambangan dari permukaan, dimensi geometri lubang bukaan, serta besarnya proyeksi tegangan vertikal maupun horizontal yang bekerja aktif menekan struktur terowongan [3].

Di samping masalah kestabilan fisik batuan pelindung, parameter keselamatan lain yang mutlak dipenuhi dalam operasi tambang bawah tanah adalah ketersediaan sistem ventilasi udara terowongan yang andal dan sirkulatif secara kontinu. Lingkungan kerja *subsurface* dicirikan oleh kondisi ruang terbatas (*confined space*) dengan sirkulasi atmosfer yang sangat terisolasi dari udara bebas permukaan [4].

Tanpa adanya sistem distribusi sirkulasi udara mekanis yang dirancang dengan baik, operasional penambangan segera dihadapkan pada ancaman maut berupa deplesi oksigen, akumulasi gas-gas beracun dan mudah meledak hasil lepasan dari lapisan batubara (*coal seam gas*) maupun sisa proses peledakan dan gas buang alat berat—seperti gas metana, karbon monoksida, karbon dioksida, dan hidrogen sulfida serta peningkatan densitas debu batubara respirabel yang sangat polutif dan eksplosif [5]. Oleh karena itu, pasokan kuantitas debit udara bersih yang diembuskan ke dalam tambang harus dihitung secara cermat untuk mengencerkan polutan gas-gas berbahaya tersebut hingga di bawah nilai ambang batas (NAB) hukum, sekaligus menjaga kenyamanan termal para pekerja tambang.

CV BMK(BMK) yang berlokasi secara administratif di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat, merupakan salah satu perusahaan pertambangan swasta nasional yang konsisten menerapkan metode penambangan batubara bawah tanah dengan sistem *room and pillar*. Perusahaan ini mengelola wilayah konsesi Izin Usaha Pertambangan (IUP) Operasi Produksi seluas 49,61 hektar, dengan estimasi cadangan sumber daya batubara ekonomis mencapai kurang lebih 1.194.168 ton [6]. Salah satu area kerja produksi terpenting dan paling aktif saat ini adalah lubang bukaan terowongan BMK 36. Operasional penambangan di tunnel BMK 36 ini menggabungkan tenaga kerja manual konvensional dalam jumlah besar dengan peralatan angkut mekanis, sehingga menciptakan beban aktivitas kerja yang sangat padat di dalam lorong terowongan bawah tanah.

Berdasarkan observasi lapangan terkini dan kompilasi laporan teknis internal, pada jalur utama maupun cabang tunnel BMK 36 dijumpai adanya indikasi penurunan tingkat kestabilan fisik yang ditunjukkan oleh timbulnya rekahan struktural, defleksi kelengkungan, dan gejala pelapukan biologis pada elemen penopang tiang kayu [7]. Di waktu yang bersamaan, para pekerja di lini depan kerja (*front* penambangan) sering kali mengeluhkan kondisi temperatur ambien yang panas menyengat disertai kelembapan udara tinggi yang melebihi batas kenyamanan ergonomis tubuh manusia, yang mengindikasikan adanya kendala pada keandalan sistem hembusan sirkulasi udara *blower* mekanis.

Apabila daya dukung mekanis material penyangga dan efisiensi suplai kuantitas ventilasi udara tambang tidak segera dievaluasi secara komprehensif, maka risiko kecelakaan kerja massal akibat ambruk batuan atap atau keracunan gas pengotor akan meningkat secara eksponensial, yang pada akhirnya menghentikan total roda produktivitas perusahaan. Penelitian artikel ilmiah ini secara khusus disusun untuk melakukan analisis integratif yang komprehensif terhadap dua pilar utama keselamatan tambang dalam di tunnel BMK 36, yaitu: (1) evaluasi kuantitatif keandalan mekanis sistem penyanggaan tiang kayu dan penguat beton bertulang, serta (2) optimalisasi teknis distribusi volume debit sistem ventilasi mekanis. Melalui pendekatan analisis korelatif dua variabel utama keselamatan ini, diharapkan dapat dihasilkan suatu rekomendasi desain rekayasa keteknikan terpadu yang mampu menciptakan lingkungan kerja tambang bawah tanah yang memenuhi regulasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pertambangan secara berkelanjutan.

Methodologi Penelitian

Penelitian keteknikan ini dilaksanakan menggunakan pendekatan kuantitatif analitis berbasis data pengukuran empiris langsung di lapangan (*in-situ field measurement*) yang dipadukan dengan pemodelan matematis teoritis geomekanika dan mekanika fluida udara. Lokasi pengambilan seluruh data primer dipusatkan pada lorong terowongan penambangan aktif lubang BMK 36 Job Site Tanah Kuning CV Bara Mitra Kencana, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto. Rangkaian kegiatan

penelitian lapangan dilaksanakan dalam kurun waktu total selama 40 hari kalender, terhitung mulai tanggal 2 Februari 2026 sampai dengan 12 Maret 2026.

Alur tahapan pelaksanaan metodologi penelitian dirancang secara sistematis terstruktur yang meliputi tahapan sebagai berikut:

1. Tahap Orientasi Lapangan dan Safety Induction: Melakukan pengenalan menyeluruh terhadap tata letak jaringan lorong tambang dalam BMK 36 serta mengikuti pengarah keselamatan kerja internal mengenai potensi bahaya ambruk dan gas beracun di bawah pengawasan Kepala Teknik Tambang (KTT).
2. Tahap Pengukuran Parameter Geoteknik Penyangga: Melakukan pengukuran langsung terhadap variasi dimensi geometri bukaan terowongan (tinggi dan lebar lorong), diameter tiang kayu penopang aktual, mengukur kerapatan jarak pasang antar-set penyangga, mengidentifikasi secara visual persentase kemunculan retakan struktural serta tingkat pembusukan biologi pada urat kayu penopang.
3. Tahap Pengukuran Parameter Ventilasi Udara: Mengukur kecepatan aliran angin aktual menggunakan alat instrumen Anemometer digital pada stasiun batas ukur jalur utama dan cabang terowongan; mengukur temperatur kering, temperatur basah, serta persentase tingkat kelembapan relatif udara menggunakan alat Psychrometer Sling; serta melakukan deteksi kuantitatif konsentrasi keberadaan gas-gas pengotor

atmosfer tambang (CH_4 , CO , CO_2 , O_2) menggunakan alat Multi Gas Detector gas berakurasi tinggi.

4. Tahap Analisis Komputasi dan Evaluasi: Melakukan perhitungan matematis untuk mencari korelasi luasan penampang terhadap volume debit angin aktual, membandingkan total pasokan udara bersih aktual terhadap standar regulasi kebutuhan teoritis total pekerja dan alat, serta menghitung kekuatan mekanis sisa dari tiang kayu penyangga untuk menyusun rekomendasi desain perbaikan keteknikan yang ideal.

Hasil dan Pembahasan

Pembuatan lubang bukaan bawah tanah menyebabkan terganggunya medan tegangan *insitu* awal yang berada dalam kondisi kesetimbangan hidrostatik statis. Batuan yang berada di sekeliling terowongan mengalami deformasi penyesuaian untuk mencapai kesetimbangan tegangan baru melalui mekanisme redistribusi beban [8]. Tegangan vertikal (σ_v) sebelum penggalian berbanding lurus dengan kedalaman (h) dan densitas batuan (γ), yang dirumuskan melalui persamaan (1) berikut:

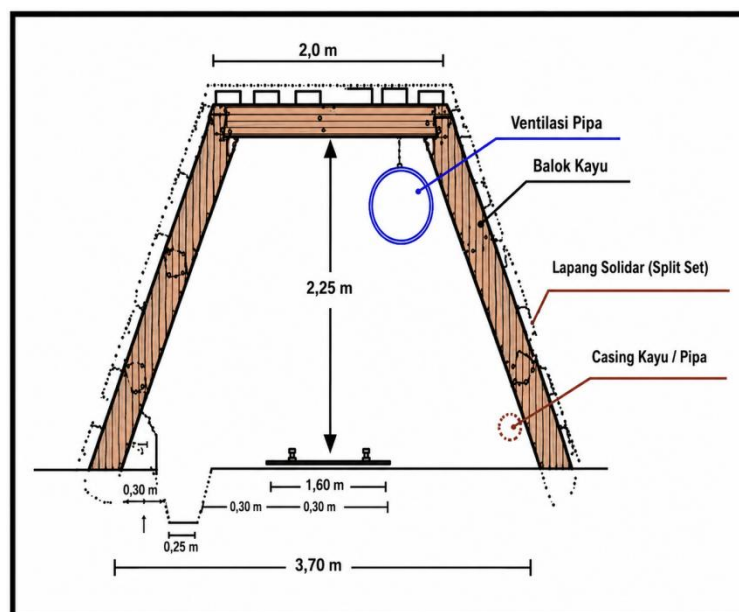
$$\sigma_v = \gamma \times h \quad \dots\dots\dots(1)$$

Setelah lubang digali, konsentrasi tegangan terkonsentrasi di area dinding terowongan (tangensial) dan mengalami penurunan di area atap. Peran utama sistem penyanggaan pasif adalah memberikan gaya perlawanan mekanis luar (P_i) untuk membatasi laju deformasi radial batuan terowongan agar tidak melewati batas runtuhnya, sesuai dengan

kurva karakteristik interaksi batuan-penyangga (*ground response curve*) [9]. Berdasarkan sifat mekanis dan cara kerjanya, tipe penyangga dikelompokkan menjadi dua sistem utama, yaitu penyangga pasif dan penyangga aktif. Penyangga pasif bersifat menunggu terjadinya pergerakan atau beban deformasi massa batuan terlebih dahulu sebelum penyangga tersebut memberikan gaya reaksi lawan secara mekanis penuh [10]. Contoh penyangga pasif meliputi penyangga kayu (*timber support*), penyangga rangka baja struktural (baja H-beam/I-beam), tiang penyangga hidrolik, dan balok beton bertulang. Sementara itu, penyangga aktif bekerja memperkuat struktur internal massa batuan itu sendiri secara langsung sejak awal dipasang untuk menahan dirinya sendiri (*self-supporting*) dengan cara menjepit dan mengikat lapisan batuan lemah ke lapisan batuan yang lebih kompeten dan stabil di bagian dalam,

contohnya adalah variasi tipe baut batuan (*rock bolt*) dan anyaman kawat baja (*wire mesh*).

Penyangga tiang kayu konvensional tipe *three pieces set* (penyangga tiga elemen) merupakan konstruksi penopang pasif yang paling banyak diaplikasikan pada operasi tambang dalam skala menengah karena sifat kayunya yang elastis dan ekonomis [11]. Struktur ini tersusun atas tiga komponen struktural utama, yaitu: satu balok horizontal penahan atap terowongan yang disebut dengan balok atap (*cap*), dan dua tiang vertikal atau agak miring di bagian kanan-kiri yang berfungsi sebagai tiang penyangga dinding (*post*). Titik kritis penyaluran beban terpusat berada pada bagian sambungan takikan (*joint*) antara ujung *cap* dan *post* yang harus dibuat presisi demi menghindari konsentrasi tegangan geser eksentris yang memicu patah mekanis dini sebelum kayu mencapai beban maksimum batas plastisnya [12].



Gambar 1. Skema Struktur Penyangga Kayu Tipe *Three Pieces Set* (Admizal, 2013).

Jaringan Ventilasi Tambang Bawah Tanah

Sistem ventilasi tambang bawah tanah dirancang mengacu pada hukum fisika mekanika fluida dinamis udara untuk mengalirkan volume udara bersih dari atmosfer luar permukaan bumi menuju ke seluruh *front* kerja penambangan, dan selanjutnya mengalirkan kembali udara kotor sisa aktivitas tambang keluar menuju permukaan secara aman [13]. Kuantitas debit aliran udara bersih (Q) yang bergerak di dalam lorong terowongan berbanding lurus dengan luas penampang basah saluran lorong (A) dikalikan dengan kecepatan rata-rata aliran udara terukur (v), yang dinyatakan dalam rumus dasar kontinuitas fluida pada persamaan (2) berikut ini:

$$Q = A \times v \quad \dots\dots\dots(2)$$

Pergerakan aliran udara di dalam lorong tambang mengalami hambatan gesek mekanis yang dipicu oleh kekasaran dinding batuan, kelokan lorong, penyempitan penampang, dan keberadaan penghalang mekanis. Hambatan total ini dikenal sebagai resistansi jaringan ventilasi (R), yang mengakibatkan terjadinya kehilangan tekanan dinamis (*head loss*, H_L). Besarnya nilai kehilangan tekanan berbanding lurus dengan nilai resistansi saluran dan pangkat dua dari debit aliran udara, mengikuti hukum Atkinson [4] pada persamaan (3) ini:

$$H_L = R \times Q^2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

Berdasarkan metode pembangkitan beda tekanan aliran, ventilasi tambang

diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu ventilasi alami (*natural ventilation*) dan ventilasi mekanis buatan (*artificial/mechanical ventilation*). Ventilasi alami murni memanfaatkan perbedaan densitas udara luar dan udara dalam tambang yang dipicu oleh perbedaan temperatur ambien vertikal alami maupun ketinggian elevasi mulut terowongan (*shaft*). Mengingat keterbatasan kestabilan debit ventilasi alami yang sangat fluktuatif terpengaruh cuaca luar, maka operasi tambang dalam wajib mengaplikasikan ventilasi mekanis menggunakan mesin kipas angin tambang berdaya besar (*fan blower/exhaust fan*). Kipas mekanis berfungsi memaksa aliran udara bergerak stabil melintasi pipa *ducting* fleksibel maupun permanen hingga menyembur tepat di depan area *front* kerja penambangan aktif yang kekurangan pasokan oksigen [5].

Analisis Karakteristik Geometri Terowongan dan Sistem Penyanggaan Aktual

Lubang terowongan produksi BMK 36 didesain menggunakan geometri penampang berbentuk persegi panjang semidistorsi mengikuti kemiringan seam lapisan batubara bawah tanah. Berdasarkan kompilasi hasil pengukuran langsung pada 15 titik stasiun pengamatan di sepanjang lorong maju (*main heading*) dan lorong cabang (*crosscut*), diperoleh rentang variasi dimensi geometri terowongan yang disajikan secara tabulasi terstruktur pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Dimensi Geometri Aktual Lorong Bukaannya Tambang BMK 36

Lokasi Stasiun Lorong	Lebar Lantai Terowongan (m)	Lebar Atap Bukaannya (m)	Tinggi Bersih Lorong (m)	Luas Penampang Basah Udara (m ²)
Jalur Utama (Stasiun 01 - 05)	2,80 - 3,00	2,40 - 2,60	2,20 - 2,40	6,16 - 7,20
Jalur Cabang (Stasiun 06 - 10)	2,40 - 2,60	2,00 - 2,20	2,00 - 2,10	4,80 - 5,46
Front Produksi (Stasiun 11 - 15)	2,20 - 2,40	1,80 - 2,00	1,80 - 1,95	3,96 - 4,68

Sistem penyanggaan utama yang diterapkan di sepanjang lorong bukannya BMK 36 didominasi oleh penyangga pasif elastis kayu dengan konfigurasi rangka interkoneksi *three pieces set*. Pemilihan material tiang kayu ini didasarkan pada melimpahnya pasokan lokal serta sifat mekanis serat kayu alami yang mampu memberikan "tanda peringatan visual dan auditori" berupa suara derit gesekan serat kayu (*creeping sound*) sesaat sebelum kayu mengalami keruntuhan patah total, sehingga memberikan waktu jeda yang sangat berharga bagi para penambang di *front* untuk melakukan evakuasi mandiri [14].

Spesifikasi material kayu yang diaplikasikan di lapangan didominasi oleh jenis kayu kelas kuat II dan III (seperti kayu laban) dengan parameter diameter rata-rata tiang tegak (*post*) berkisar antara 18 cm hingga 22 cm, dan panjang bentang balok atap (*cap*) berkisar antara 2,0 meter hingga 2,5 meter menyesuaikan lebar atap terowongan. Selain elemen utama *cap* dan *post*, struktur penyanggaan di tunnel

BMK 36 dilengkapi dengan komponen aksesoris perkuatan mekanis tambahan, antara lain:

1. Kayu Atap Tembak (Lagging/Spiling): Balok kayu belahan berdiameter lebih kecil (8–12 cm) yang disisipkan secara rapat di atas balok *cap* membujur sejajar sumbu terowongan, berfungsi menahan jatuhnya bongkahan batu ukuran kecil-menengah di antara jarak antar-set penyangga.
2. Cribbing (Ganjil Balok Susun): Susunan balok kayu pendek berbentuk segi empat yang ditumpuk di atas *cap* untuk mengisi rongga kosong (*void*) akibat *overbreak* peledakan, sehingga penyaluran beban batuan atap ke penyangga *cap* berjalan merata tanpa efek impak kejut.
3. Tonggak Babi (Stud/Strut): Balok kayu horizontal pendek pengunci antar-set penyangga berdekatan yang dipasang pada bagian sudut atas, berfungsi menahan gaya dorong longitudinal akibat efek getaran peledakan *front* maju.



Gambar 2. Penyangga Kayu *Three Pieces Set* CV. BMK



Gambar 3. Penyangga Beton Bertulang CV BMK

Pada beberapa zona persimpangan lorong utama (*junction*) yang memiliki bentang bukaan lebih lebar dan memikul konsentrasi tegangan ganda, diaplikasikan sistem penyanggaan komposit berupa kombinasi tiang kolom beton bertulang (*reinforced concrete*

block) cor di tempat dengan dimensi penampang 40 cm x 40 cm. Penguatan struktural beton bertulang ini terbukti sangat efektif membatasi laju deformasi merayap (*creeping*) massa batuan dinding terowongan yang rentan mengalami keruntuhan jepit akibat

pengaruh tekanan remasan hidrostatis batuan sedimen formasi ombilin [7].

Analisis Faktor Penyebab Kerusakan Struktural Penyangga Kayu

Berdasarkan sensus inventarisasi visual menyeluruh terhadap total 120 set penyangga kayu yang terpasang di sepanjang lorong bukaan aktif BMK 36, ditemukan fakta teknis mengkhawatirkan di mana sekitar 34% dari total set penyangga telah mengalami gejala degradasi mekanis struktural dalam berbagai tingkatan kerusakan.

Jenis kerusakan mekanis dominan yang berhasil diidentifikasi di lapangan meliputi patah geser pada takikan *joint* sambungan, retak rambut membujur sejajar serat tiang *post* akibat beban tekan berlebih, kelenturan melengkung melebihi batas toleransi pada tengah bentang balok *cap*, serta pembusukan serat biologis akibat kelembapan tinggi. Data persentase kontribusi faktor pemicu kerusakan struktural penyangga disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Persentase Faktor Dominan Pemicu Kerusakan Struktural Penyangga Kayu

No.	Kategori Faktor Penyebab Kerusakan Teknis	Jumlah Set Terdampak	Persentase Kontribusi (%)
1	Beban Tekan Massa Batuan Melebihi Kuat Tekan Kayu (<i>Overloading</i>)	16 Set	39,02 %
2	Pelapukan Biologis dan Pembusukan Jamur Akibat Kelembapan Ekstrem	12 Set	29,27 %
3	Ketidaktepresian Geometri Takikan Sambungan Ujung Pasak (<i>Bad Jointing</i>)	8 Set	19,51 %
4	Kerusakan Mekanis Akibat Benturan Operasional Alat Angkut <i>Dump Truck</i>	5 Set	12,20 %
TOTAL ELEMEN RUSAK		41 Set	100,00 %

Faktor *overloading* mekanis (39,02%) terjadi dipicu oleh ketidaksesuaian penentuan jarak pasang (*spacing*) antar-set penyangga aktual di lapangan yang terlalu renggang, di mana pada beberapa ruas lorong *crosscut* dijumpai jarak antar-set mencapai 1,5 meter hingga 1,8 meter. Jarak yang terlalu lebar ini mengakibatkan luas area pengaruh beban (*tributary area*) yang harus dipikul oleh satu balok *cap* tunggal menjadi terlampaui besar, melebihi modulus elastisitas patah kayu (*MoR*) berdasarkan hukum mekanika bahan [11]. Sementara itu, faktor pelapukan

biologis jamur (29,27%) dipicu langsung oleh buruknya iklim mikro atmosfer dalam terowongan yang dicirikan oleh tingginya kadar kelembapan relatif udara [17].

Evaluasi Parameter Kuantitas dan Kualitas Udara Sistem Ventilasi

Sistem ventilasi mekanis yang beroperasi di tunnel BMK 36 menerapkan metode ventilasi mekanis sistem hembus (*forcing system*). Sistem ini bekerja dengan mengisap udara segar dari atmosfer luar menggunakan unit kipas *blower* aksial elektrik (*axial fan blower*) berkekuatan daya motor 15 kW

yang ditempatkan di dekat mulut terowongan (*portal*), dan menyalurkannya ke *front* penambangan terdalam melalui pipa *ducting* fleksibel berbahan terpal karet berdiameter 60 cm [15]. Berdasarkan kompilasi hasil pengukuran langsung menggunakan instrumen anemometer dan

psychrometer sling pada stasiun batas ukur utama jaringan ventilasi, diperoleh rangkuman parameter kuantitas dan kualitas iklim mikro udara tambang sebagaimana disajikan secara komprehensif pada Tabel 4.

Tabel 4. Kumpulan Data Pengukuran Kuantitas dan Kualitas Atmosfer Udara Terowongan BMK 36

Stasiun Batas Ukur	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Debit Udara Aktual (m ³ /menit)	Temperatur Kering (°C)	Kelembapan Relatif (%)
Portal Utama Tambang (<i>Intake</i>)	1,85	685,20	26,4	82,5 %
Lorong Utama Maju (Stasiun 03)	0,75	292,50	28,8	90,2 %
Front Penambangan Aktif (<i>Front</i>)	0,62	155,00	31,5	91,8 %

Berdasarkan analisis data pada Tabel 4, terlihat jelas terjadinya penurunan volume debit aliran udara bersih yang sangat drastis, yaitu dari semula sebesar 685,20 m³/menit di mulut portal *intake* luar, menyusut tajam hingga hanya tersisa sebesar 155,00 m³/menit pada area *front* penambangan aktif tempat pekerja beraktivitas. Penurunan debit aliran udara yang mencapai 77,38% ini mengindikasikan adanya permasalahan kebocoran kuantitas (*air leakage*) yang sangat parah pada sepanjang jalur instalasi pipa *flexible ducting* [15]. Kebocoran sirkulasi udara ini disebabkan oleh robeknya dinding kain terpal *ducting* akibat gesekan ujung batuan runcing, sambungan antar-segmen pipa yang hanya diikat menggunakan kawat konvensional tanpa *seal* karet kedap udara, serta besarnya nilai resistansi hambatan gesek lorong akibat tumpukan material batubara di

tepi dinding terowongan. Dampak langsung dari penurunan debit udara ini memicu kenaikan temperatur kering udara *front* mencapai 31,5°C dengan kelembapan relatif ekstrem sebesar 91,8%. Kondisi iklim kerja termal seburuk ini berada jauh di luar batas aman regulasi Kemen ESDM RI No. 185.K/2019 yang membatasi temperatur kerja tambang dalam maksimum sebesar 30°C dengan kelembapan ideal di bawah 85%, sehingga memicu dehidrasi akut dan penurunan konsentrasi kerja para penambang [16].

Kondisi penurunan kuantitas suplai udara ini juga berdampak linier terhadap akumulasi konsentrasi gas-gas pengotor hasil lepasan formasi batubara (*coalbed methane*) pada atmosfer terowongan *front* kerja. Hasil deteksi instrumen *multi gas detector* menangkap nilai konsentrasi parameter gas pengotor aktual yang dibandingkan terhadap Nilai

Ambang Batas (NAB) hukum pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Konsentrasi Aktual Gas Pengotor Terowongan Terhadap NAB Regulasi

No.	Jenis Parameter Gas Tambang	Konsentrasi Aktual di Front	Nilai Ambang Batas (NAB)	Status Evaluasi Keselamatan Kerja
1	Gas Oksigen	19,20 %	Minimal 19,50 %	Kritis (Deplesi Oksigen)
2	Gas Metana	0,45 %	Maksimal 0,50 %	Waspada (Dekat Batas Ledak)
3	Gas Karbon Monoksida	28,00 ppm	Maksimal 25,00 ppm	Bahaya (Melebihi Batas Aman)
4	Gas Karbon Dioksida	4500,00 ppm	Maksimal 5000,00 ppm	Aman (Di Bawah Batas)

Temuan kuantitatif pada Tabel 5 menunjukkan sinyal bahaya bagi keselamatan jiwa pekerja tambang. Konsentrasi gas oksigen O₂ berada pada angka 19,20%, di bawah batas minimum aman yang diwajibkan undang-undang yaitu sebesar 19,50% [16]. Kekurangan pasokan oksigen ini berjalan simultan dengan melonjaknya kadar gas beracun Karbon Monoksida CO hingga menyentuh angka 28,00 ppm, melewati Nilai Ambang Batas maksimal legal 25,00 ppm. Akumulasi CO yang tinggi ini bersumber dari gas buang sisa pembakaran internal armada *dump truck* pengangkut batubara yang beroperasi di dalam lorong tanpa sirkulasi pembilasan udara yang memadai, sehingga gas beracun tersebut terjebak dan terhirup langsung oleh para penambang manual.

Analisis Kebutuhan Teoritis Udara Bersih Terowongan BMK 36

Guna merumuskan langkah optimalisasi rekayasa sirkulasi sirkuit ventilasi, dilakukan perhitungan teoritis kebutuhan debit udara bersih minimal berdasarkan regulasi teknis keselamatan

pertambangan Kepdirjen Minerba No. 185.K/2019. Parameter perhitungan mengintegrasikan dua variabel pembatas utama, yaitu: jumlah total pekerja *shift* terjauh dan daya mesin mekanis diesel yang beroperasi.

A. Kebutuhan Udara Berdasarkan Jumlah Tenaga Kerja Fisik ($Q_{pekerja}$)

Setiap pekerja yang melakukan aktivitas fisik di dalam lorong tambang wajib diberikan pasokan udara segar minimum sebesar 2,0 m³/menit per orang. Mengingat pola kerja tambang BMK 36 bersifat konvensional manual, jumlah pekerja maksimum yang berada di dalam lorong terowongan pada satu *shift* kerja terpadat mencapai N = 251 Orang.

B. Kebutuhan Udara Berdasarkan Operasional Peralatan Mesin Diesel (Q_{diesel})

Di dalam jalur utama terowongan dioperasikan peralatan mekanis angkut batubara berupa *dump truck* diesel mini dengan total daya mesin gabungan terhitung sebesar P = 120 HP. Regulasi mengamanatkan kewajiban pasokan udara pembilas emisi gas buang mesin diesel sebesar 3,0 m³/menit untuk setiap satu satuan daya *Horse Power* (HP)

mesin aktif. Maka volume debit kebutuhan pembilas dihitung melalui persamaan:

C. Kebutuhan Udara Total Ideal Jaringan Terowongan (Q_{total})

Total kebutuhan volume debit pasokan udara teoritis bersih yang wajib disemburkan masuk ke dalam sistem jaringan terowongan BMK 36 merupakan penjumlahan akumulatif dari kedua variabel di atas

$$Q_{total\ teoritis} = Q_{pekerja} + Q_{diesel}$$

$$Q_{total\ teoritis} = 502,0 + 360,0 = 862,0 \text{ m}^3/\text{menit}$$

Apabila nilai kebutuhan teoritis total ideal sebesar 862,0 m³/menit ini dikomparasikan secara langsung terhadap nilai volume debit aliran pasokan angin aktual yang berhasil mencapai *front* kerja penambangan saat ini (yang hanya sebesar 155,0 m³/menit), maka diperoleh nilai defisit pasokan udara bersih yang sangat masif, yaitu sebesar 707,0 m³/menit (defisit 82,01% dari standar). Angka defisit yang sangat tinggi ini menerangkan secara ilmiah mengapa kondisi *front* penambangan lorong maju BMK 36 berada dalam kondisi tidak sehat, panas menyengat, mengalami deplesi oksigen, serta akumulasi gas beracun CO yang membahayakan keselamatan para pekerja tambang.

Strategi Integrasi Desain Rekayasa Penyanggaan dan Ventilasi Aman

Menyikapi temuan kendala keteknikan ganda berupa tingkat kerusakan mekanis penyangga kayu dan masifnya defisit debit ventilasi udara di tunnel BMK 36, maka penelitian integratif ini merumuskan sebuah konsep strategi integrasi desain rekayasa keteknikan (*integrated engineering design*) terpadu:

1. Optimalisasi Reduksi Jarak Spacing Penyangga Tiga Elemen Kayu: Jarak antar-set tiang kayu wajib dipersempit (*dikompresi*) dari semula rata-rata 1,5 meter menjadi maksimum sebesar 1,0 meter pada area lorong maju, serta dipersempit hingga maksimum 0,8 meter pada zona batuan lemah bertekstur lunak (*shale*/lempung sedimen). Langkah keteknikan ini mampu mereduksi beban luas area *tributary* yang dipikul satu *cap* tiang tunggal sebesar 33,3%, sehingga meningkatkan nilai Faktor Keamanan struktural (FK) penyangga berada di atas batas aman minimal FK 1,5 [3].
2. Standardisasi Dimensi Takikan Pasak Udang dan Pelapisan Bahan Pengawet: Pembuatan sambungan takikan *joint* antara ujung *cap* dan *post* tiang kayu wajib diseragamkan menggunakan cetakan mesin mal khusus berbentuk takikan pasak ganda (*pasak udang*) dengan kedalaman konstan 1/3 dari diameter total log kayu [14]. Pola sambungan presisi ini menjamin penyaluran distribusi gaya aksial vertikal batuan atap terbagi secara sentris merata ke pusat tiang *post* tanpa memicu timbulnya momen lentur eksentris sekunder. Seluruh permukaan tiang kayu log sebelum dipasang diwajibkan menjalani proses perendaman cairan kimia pengawet antijamur (kreosot) untuk menahan laju pembusukan biologis serat akibat pengaruh kelembapan relatif terowongan yang tinggi.
3. Rekayasa Eliminasi Kebocoran Udara Flexible Ducting: Sambungan konvensional menggunakan kawat

ikat pada pipa ventilasi terpal wajib diganti total menggunakan sistem klem cincin baja melingkar (*steel ring clamp*) yang dilapisi dengan gasket karet kedap udara (*rubber seal*) [15]. Setiap segmen pipa yang mengalami kerusakan robek atau bocor mikro wajib ditambal menggunakan sistem las kain panas (*hot vulcanized patch*). Lorong terowongan wajib dibersihkan secara berkala dari segala bentuk tumpukan material di tepi dinding demi menjaga sirkulasi penampang basah udara guna meminimalkan koefisien gesek resistansi lorong sesuai hukum Atkinson.

Peningkatan Rating Kapasitas Daya Fan Blower Mekanis: Mengganti unit *blower fan* utama berkapasitas 15 kW lama dengan unit kipas angin aksial tambang

Kesimpulan

Sistem penyanggaan eksisting di Terowongan BMK 36 CV BMK menggunakan struktur pasif tiang kayu tipe *three pieces set* (diameter 18–22 cm) dengan perkuatan balok beton bertulang 40 cm x 40 cm pada zona *junction* kritis. Namun, inventarisasi visual geoteknik menunjukkan tingkat kerusakan mekanis penyangga kayu aktual telah mencapai 34%. Kegagalan struktural ini didominasi oleh *overloading* beban batuan atap akibat jarak antar-set yang terlalu renggang (1,5–1,8 meter) serta diperparah oleh pelapukan biologis serat kayu.

Di sisi lain, sistem ventilasi mekanis metode hembus aktual mengalami inefisiensi distribusi udara yang sangat masif akibat kebocoran pipa *ducting* dan

dalam tipe ganda (*dual-stage axial flow fan*) berkapasitas daya motor minimal 37 kW yang mampu menghasilkan tekanan statis tinggi untuk menembus resistansi jaringan pipa *ducting* yang panjang. Penggantian ini diproyeksikan mampu mendongkrak semburan volume debit angin masuk mencapai angka minimal 900 m³/menit pada mulut terowongan portal, sehingga menjamin volume debit udara bersih yang mendarat tepat di *front* penambangan aktif konstan berada di atas batas aman teoritis. Semburan angin yang kuat ini secara otomatis mengencerkan konsentrasi akumulasi gas beracun CO hingga *drop* di bawah 15 ppm serta menaikkan kadar O₂ di atas 20,0% sesuai standar baku mutu internasional [14].

tingginya resistansi gesek lorong. Hal ini menyebabkan debit angin menyusut tajam dari 685,20 m³/menit di portal utama hingga tersisa hanya 155,00 m³/menit pada *front* penambangan aktif. Volume ini mengalami defisit besar dari standar regulasi minimum yang diwajibkan sebesar 862,00 m³/menit untuk kebutuhan keselamatan 251 tenaga kerja fisik dan pembilasan emisi mesin diesel 120 HP.

Defisit pasokan udara tersebut berdampak langsung pada penurunan kualitas atmosfer lingkungan kerja terowongan yang ekstrem. Kondisi ini ditandai oleh lonjakan temperatur ambien hingga 31,5°C, kelembapan relatif 91,8%, deplesi kadar oksigen (O₂) menjadi 19,20%, serta akumulasi gas beracun karbon monoksida (CO)

mencapai 28,00 ppm yang telah melampaui ambang batas aman hukum pertambangan.

Daftar Pustaka

- Sukandarrumidi. (2009). *Batubara dan Pemanfaatannya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- McBreath, D. R., & Kaiser, P. K. (1992). *Support Systems in Underground Mining*. Rotterdam: Balkema.
- Singh, B., & Singh, T. N. (2014). *Rock Mass Classification and Tunnel Support*. New Delhi: CRC Press.
- Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. J. (1997). *Mine Ventilation and Air Conditioning*. New York: John Wiley & Sons.
- McPherson, M. J. (1993). *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. London: Chapman & Hall.
- Pratama, A. (2024). *Laporan Teknis Evaluasi Sistem Penyangga pada Lubang Bukaannya BMK-36 CV Bara Mitra Kencana*. Sawahlunto: Departemen Geoteknik CV BMK
- Simbolon, W. P. (2023). Evaluasi Sistem Penyangga Menggunakan Metode Rock Mass Rating (RMR) pada Tambang Bawah Tanah. *Jurnal Bina Tambang*, 8(3), 112-121.
- Palchik, V., & Hudyma, M. (2004). *Ground Control in Underground Mining*. New York: Taylor & Francis.
- Rahman, V. F. (2023). *Sistem Penyangga Tambang Batubara Bawah Tanah*. Bandung: Jurnal Universitas Padjadjaran.
- Mutia. (2016). Studi Kestabilan Lubang Bukaannya pada Tambang Batubara Bawah Tanah. *Jurnal Pertambangan Indonesia*, 4(2), 45-52.
- Suryani. (2025). Analisis Stabilitas Massa Batuan pada Tambang Bawah Tanah. *Jurnal Geoteknik Tambang*, 11(1), 14-23.
- Tanto, N. A. (2024). *Desain Penyangga pada Zona Squeezing di Tambang Bawah Tanah*. Yogyakarta: Tesis Magister Universitas Gadjah Mada.
- Sosrodarsono, S. (2003). *Mekanika Fluida untuk Teknik Sipil*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Ariel, S. A. (2026). *Analisis Sistem Penyanggaan yang Digunakan di Lubang Bukaannya Tambang BMK 36 CV. BMK(BMK)*. Laporan Kerja Praktik. Padang: Program Studi Teknik Pertambangan, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang.
- Raihan, A. (2026). *Evaluasi dan Optimalisasi Sistem Ventilasi pada Underground Mining di Tunnel BMK 36 CV. BMK Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto*. Laporan Kerja Praktik. Padang: Program Studi Teknik Pertambangan, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2019). *Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 185.K/37.04/DJB/2019 tentang Petunjuk Teknis Pelaksanaan Keselamatan Pertambangan dan Pelaksanaan, Penilaian, serta Pelaporan Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan Mineral dan Batubara*. Jakarta: Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM.
- Wijaksana, I. K. (2025). Implementasi Shotcrete sebagai Sistem



Penyangga Tambang Bawah Tanah.
Jurnal Rekayasa Tambang, 3(1),
78-85.