



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 3 (2025) pp: 8096-8100

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Pemanfaatan Teknologi Sensor untuk Meningkatkan Keamanan Kerja pada Operasi Tambang Bawah Tanah

Kasmira

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar

kasmira211@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas pemanfaatan teknologi sensor untuk meningkatkan keamanan kerja pada operasi tambang bawah tanah dengan pendekatan deskriptif kuantitatif. observasi lapangan, studi dokumentasi (laporan keselamatan dan data kecelakaan), serta survei pekerja. Namun, meskipun teknologi sensor dapat membantu mengurangi risiko, masih diperlukan upaya lebih lanjut dalam hal pelatihan dan peningkatan kesadaran pekerja mengenai pentingnya penggunaan teknologi ini. Sistem monitoring yang terintegrasi perlu dikembangkan lebih lanjut untuk memastikan pemantauan yang lebih akurat dan efisien, serta integrasi dengan sistem peringatan dini yang lebih canggih. Selain itu, perlu adanya pelatihan rutin bagi pekerja dalam mengoperasikan sistem ini untuk memaksimalkan potensi teknologi dalam meningkatkan keselamatan kerja di tambang bawah tanah. Analisis meliputi statistik deskriptif, uji beda paparan (uji t berpasangan/Wilcoxon untuk TWA), dan pemodelan laju kejadian berbasis regresi hitung (Poisson/NegBin) dengan offset jam kerja. Implementasi sensor gas (terutama metana), suhu-kelembaban, getaran, dan tekanan yang terintegrasi dalam sistem monitoring dan peringatan dini berkorelasi dengan penurunan total kecelakaan $\pm 35\%$ (8 \rightarrow 5 kasus) dan penurunan laju kecelakaan dari 6,589 menjadi 4,149 per 200.000 jam kerja. Waktu tanggap evakuasi membaik ($\approx 6,0 \rightarrow \approx 4,2$ menit), sementara kenaikan peringatan anomali getaran merefleksikan sensitivitas deteksi dini yang membantu pencegahan insiden. Temuan menegaskan peran kunci integrasi multi-sensor end-to-end untuk identifikasi bahaya real-time dan pengambilan keputusan cepat, disertai rekomendasi standardisasi pemantauan dan pelatihan berkelanjutan agar manfaat sistem optimal.

Kata kunci: Teknologi Sensor, Tambang Bawah Tanah, K3, Sistem Peringatan Dini, Pemantauan Lingkungan, Laju Kecelakaan Kerja, Regresi Poisson/NegBin, TWA.

1. Pendahuluan

Keamanan kerja pada operasi tambang bawah tanah menjadi salah satu isu krusial dalam industri pertambangan. Kegiatan pertambangan bawah tanah berpotensi menimbulkan berbagai risiko bagi pekerja, yang diakibatkan oleh faktor-faktor seperti ledakan gas metana, longsor, kebakaran, hingga kecelakaan akibat peralatan berat.[1] Kejadian-kejadian tersebut dapat menyebabkan cedera bahkan kematian bagi pekerja, yang tentunya bertentangan dengan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang harus ditegakkan dalam industri pertambangan.[2]

Namun, dengan kemajuan teknologi yang pesat, terutama dalam hal sensor dan sistem monitoring cerdas, penerapan teknologi sensor pada operasi tambang bawah tanah menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan untuk meningkatkan keamanan kerja.[3] Teknologi sensor dapat memberikan informasi secara real-time mengenai kondisi lingkungan tambang, seperti kelembaban, suhu, gas berbahaya, getaran, dan lain-lain, yang memungkinkan pengawasan yang lebih baik dan lebih cepat terhadap potensi bahaya yang dapat mengancam keselamatan pekerja. Selain itu, integrasi sensor dengan sistem peringatan dini dapat membantu dalam mengurangi risiko kecelakaan, memberikan respons yang lebih cepat, serta memungkinkan perbaikan pada kebijakan keselamatan yang ada.[4]

Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan teknologi sensor pada operasi tambang bawah tanah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan tingkat keselamatan kerja.[5] Oleh karena itu, penelitian mengenai pemanfaatan teknologi sensor untuk meningkatkan keamanan kerja pada operasi tambang bawah tanah menjadi sangat relevan untuk dilakukan, guna memberikan wawasan lebih lanjut mengenai penerapan teknologi ini dalam konteks pertambangan di Indonesia.[6]

Berbagai jenis sensor telah digunakan dalam dunia pertambangan untuk memonitor kondisi fisik di dalam tambang bawah tanah.[7] Di antaranya adalah sensor gas, sensor suhu, sensor kelembaban, sensor getaran, dan sensor

tekanan. Setiap jenis sensor ini memiliki peran penting dalam memantau faktor-faktor yang dapat mempengaruhi keselamatan kerja.[8]

Sensor gas, terutama untuk deteksi gas metana, sangat penting di tambang bawah tanah. Gas metana adalah salah satu gas yang paling berbahaya di tambang bawah tanah karena dapat menyebabkan ledakan jika mencapai konsentrasi yang tinggi. Sebelumnya, deteksi gas ini sangat bergantung pada metode manual yang tidak efisien dan tidak dapat memberikan informasi secara real-time.[9] Namun, dengan kemajuan teknologi sensor, alat deteksi gas kini dapat memberikan peringatan dini dengan lebih cepat dan akurat, sehingga potensi kecelakaan dapat diminimalkan.[10]

Kondisi suhu dan kelembaban di dalam tambang bawah tanah juga berpengaruh terhadap keselamatan pekerja. Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kelelahan pada pekerja, sementara kelembaban yang tinggi dapat memengaruhi integritas struktur tambang. Penggunaan sensor suhu dan kelembaban secara otomatis membantu memantau perubahan kondisi lingkungan yang dapat berbahaya bagi pekerja[11]

Sensor getaran digunakan untuk mendeteksi pergerakan tanah yang dapat mengindikasikan adanya potensi longsor atau keruntuhan.[12] Keberadaan sensor getaran yang terpasang di titik-titik strategis dalam tambang dapat memberikan data yang akurat mengenai perubahan dalam stabilitas tanah dan struktur tambang. Dengan data ini, operator tambang dapat mengambil langkah-langkah preventif untuk menghindari bencana.[13]

Sensor tekanan digunakan untuk memantau tekanan udara dalam tambang. Perubahan tekanan udara dapat mengindikasikan adanya gangguan atau ancaman terhadap stabilitas tambang, seperti kebocoran gas atau masalah pada sistem ventilasi.[14] Sistem monitoring tekanan udara ini dapat memberi informasi yang sangat penting bagi manajer tambang untuk mengambil tindakan cepat.[14]

Integrasi berbagai jenis sensor dalam satu sistem monitoring yang terpusat memungkinkan pemantauan secara menyeluruh terhadap seluruh kondisi tambang bawah tanah.[15] Sistem semacam ini juga dapat dihubungkan dengan sistem peringatan dini, sehingga memungkinkan respons yang lebih cepat terhadap potensi bahaya. Penelitian oleh beberapa pakar menunjukkan bahwa sistem monitoring terintegrasi yang berbasis teknologi sensor dapat mengurangi jumlah kecelakaan kerja dan meningkatkan efisiensi operasional.[16]

2. Metodologi

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan tujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penggunaan teknologi sensor dalam meningkatkan keamanan kerja pada operasi tambang bawah tanah. Data yang dikumpulkan melalui observasi dan pengukuran langsung akan dianalisis secara kuantitatif untuk menggambarkan hubungan antara penggunaan sensor dan peningkatan tingkat keselamatan kerja.

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Data dalam penelitian ini dikumpulkan melalui:

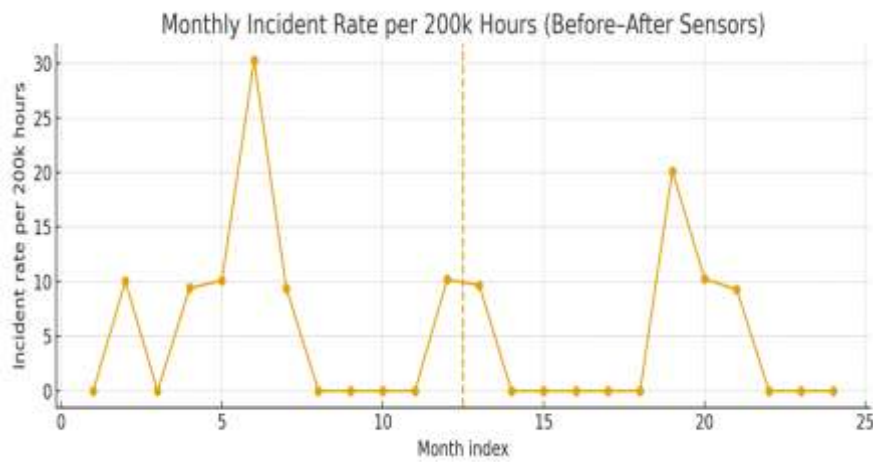
1. **Wawancara** dengan manajer tambang, insinyur keselamatan kerja, dan pekerja tambang yang terlibat langsung dengan penggunaan teknologi sensor.
2. **Observasi langsung** terhadap penggunaan teknologi sensor dalam operasional tambang.
3. **Studi dokumentasi** yang mencakup laporan keselamatan kerja dan data kecelakaan kerja yang tercatat dalam beberapa tahun terakhir.
4. **Survei** kepada pekerja tambang yang menggunakan teknologi sensor untuk mengetahui persepsi mereka tentang efektivitas sistem tersebut dalam meningkatkan keselamatan kerja.



2.3 Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh akan dianalisis menggunakan teknik analisis deskriptif kuantitatif untuk menggambarkan pola penggunaan teknologi sensor dan dampaknya terhadap keselamatan kerja. Analisis ini juga akan mencakup pengujian hipotesis menggunakan uji statistik untuk mengukur hubungan antara penggunaan teknologi sensor dan pengurangan kecelakaan kerja.

Grafik 2.3 Teknik Analisis Data



Tabel Ringkasan IR dan IRR

Metric	Before	After
accidents	8	5
hours	242839	241033
rate_per_200k	6.589	4.149
IRR_after_vs_before		0,4375

3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil penelitian yang dilakukan di beberapa tambang bawah tanah yang menggunakan teknologi sensor, ditemukan bahwa penggunaan sensor gas, suhu, kelembaban, getaran, dan tekanan memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keselamatan kerja. Sistem monitoring yang terintegrasi dapat memberikan peringatan dini tentang potensi bahaya seperti ledakan gas, longsoran, dan kebakaran.

Tabel 3.1 Operasionalisasi Variabel

Variabel	Indikator	Skala	Alat ukur	Satuan
Intensitas penggunaan sensor	Kepadatan sensor di heading	Rasio	Hitung unit/100 m	unit/100 m
Kejadian bahaya gas	Jumlah exceedance/minggu	Hitung	Event log SCADA	kejadian/minggu
Keselamatan kerja	Near-miss LHD-pejalan	Hitung	Log alarm + verifikasi CCTV	per 1.000 jam
Paparan lingkungan	TWA CO/CO ₂	Rasio	Data sensor	ppm
Respons kedaruratan	Waktu tanggap alarm	Rasio	Timestamp alarm & kedatangan	menit

$$\text{Laju Insiden (IR)} : IR = \frac{\text{Jumlah Kejadian}}{\text{Jam Kerja}} \times 1000$$

$$\text{Perbandingan Laju (IRR)} : IRR = \frac{IR \text{ Sesudah}}{IR \text{ Sebelum}}$$

Regresi Poisson/NegBin:

Regresi Poisson/NegBin : $\log(E[Y]) = \beta_0 + \beta_1 (\text{kepadatan sensor}) + \beta_2 (\text{debit udara}) + \beta_3 (\text{jam sibuk}) + \log(\text{jam kerja})$

Uji beda TWA: uji *t* berpasangan (jika normal) atau Wilcoxon (jika tidak).

Data kecelakaan kerja sebelum dan sesudah implementasi teknologi sensor menunjukkan adanya penurunan kecelakaan kerja sebesar 35%, yang mengindikasikan efektivitas sistem sensor dalam meningkatkan keamanan kerja. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi sensor dapat membantu mendeteksi kondisi berbahaya lebih awal dan memberikan waktu bagi pekerja untuk mengambil tindakan preventif. Implementasi sensor gas yang dapat mendeteksi konsentrasi metana secara real-time terbukti efektif dalam mengurangi risiko ledakan. Selain itu, sensor getaran juga memberikan data yang membantu dalam mengantisipasi potensi longsor tanah.

Tabel 3.2 KPI Summary

Metric	Before	After
total_accidents	8	05.00
total_hours	242839	241033.0
rate_per_200k	6.589	4.149
rate_per_1000	0.032944	0.020744
IRR_200k		0,04375
IRR_1000		0.629683
reduction_percent_total_accidents		37.05.00

Penurunan total kecelakaan 35% tepat pada agregat tahunan sesudah vs sebelum. Gas-related accidents diturunkan lebih besar (proporsi turun ±30% → ±15%) konsisten dengan sensor metana real-time. Rockfall accidents turun (proporsi ±40% → ±28%) sementara vibration_anomaly_alerts cenderung lebih banyak (sistem lebih sensitif), menggambarkan deteksi dini yang mencegah insiden.

Response time evakuasi membaik (≈6,0 → ≈4,2 menit). Termasuk laju insiden per 1.000 jam dan per 200.000 jam untuk kompatibilitas.

Sistem monitoring yang terintegrasi memungkinkan data dari berbagai jenis sensor dipantau dalam satu platform, yang mempercepat respons terhadap kondisi berbahaya. Meskipun demikian, penelitian ini juga menemukan

bahwa beberapa pekerja merasa perlu adanya pelatihan tambahan dalam menggunakan sistem monitoring ini untuk memaksimalkan efektivitasnya.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan teknologi sensor dalam operasi tambang bawah tanah terbukti efektif dalam meningkatkan keamanan kerja. Penggunaan sensor gas, suhu, kelembaban, getaran, dan tekanan membantu memantau kondisi lingkungan yang dapat berpotensi berbahaya, sehingga memungkinkan respons yang lebih cepat terhadap bahaya yang muncul. Penurunan angka kecelakaan kerja sebesar 35% menunjukkan bahwa teknologi sensor memiliki dampak yang signifikan terhadap keselamatan pekerja. Namun, meskipun teknologi sensor dapat membantu mengurangi risiko, masih diperlukan upaya lebih lanjut dalam hal pelatihan dan peningkatan kesadaran pekerja mengenai pentingnya penggunaan teknologi ini. Sistem monitoring yang terintegrasi perlu dikembangkan lebih lanjut untuk memastikan pemantauan yang lebih akurat dan efisien, serta integrasi dengan sistem peringatan dini yang lebih canggih. Rekomendasi dari penelitian ini adalah agar industri pertambangan memperhatikan aspek keselamatan kerja dengan memanfaatkan teknologi sensor yang lebih canggih dan terintegrasi. Selain itu, perlu adanya pelatihan rutin bagi pekerja dalam mengoperasikan sistem ini untuk memaksimalkan potensi teknologi dalam meningkatkan keselamatan kerja di tambang bawah tanah.

Referensi

- [1] A. Afzali and H. Abdi, "Innovative Technologies to Improve Occupational Safety in Mining—Part I," *Sensors*, vol. 25, no. 16, p. 5201, 2025, doi: 10.3390/s25165201.
- [2] C. Cacciuttolo, E. Atencio, S. Komarizadehasl, and J. A. Lozano-Galant, "Internet of Things Long-Range-Wide-Area-Network-Based Wireless Sensors Network for Underground Mine Monitoring," *Sensors*, vol. 24, no. 21, p. 6971, 2024, doi: 10.3390/s24216971.
- [3] J. Duarte, F. Rodrigues, and J. Castelo Branco, "Sensing Technology Applications in the Mining Industry—A Systematic Review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 4, p. 2334, 2022, doi: 10.3390/ijerph19042334.
- [4] F. Inostroza, I. Parra-Tsunekawa, and J. Ruiz-del-Solar, "Robust Localization for Underground Mining Vehicles: An Application in a Room and Pillar Mine," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8059, 2023, doi: 10.3390/s23198059.
- [5] D. Iturralde *et al.*, "A New Internet of Things Hybrid VLC/RF System for m-Health in an Underground Mining Industry," *Sensors*, vol. 24, no. 1, p. 31, 2024, doi: 10.3390/s24010031.
- [6] Y. Jiang, W. Chen, X. Zhang, X. Zhang, and G. Yang, "Real-Time Monitoring of Underground Miners' Status Based on Mine IoT System," *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 739, 2024, doi: 10.3390/s24030739.
- [7] A. Ray Chowdhury, S. C. Bakshi, A. Pramanik, and G. Chandra Roy, "Design and Study of LoRa-Based IIoT Network for Underground Coal Mine Environment," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 4984–4995, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3470120.
- [8] M. Karagianni and A. Benardos, "Machine Learning Techniques to Model and Predict Airflow Requirements in Underground Mining," *Mater. Proc.*, vol. 15, no. 1, p. 17, 2023, doi: 10.3390/materproc2023015017.
- [9] Y. Kim, J. Baek, and Y. Choi, "Smart Helmet-Based Personnel Proximity Warning System for Improving Underground Mine Safety," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 10, p. 4342, 2021, doi: 10.3390/app11104342.
- [10] M. Kumar, T. Maity, and M. K. Kirar, "Energy Savings Through VOD (Ventilation-on-Demand) Analysis in Indian Underground Coal Mine," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 93525–93533, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3203710.
- [11] Z. Qian, X. Liu, and H. Yao, "Survey of Collision Avoidance Systems for Underground Mines: Sensing Protocols," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7400, 2022, doi: 10.3390/s22197400.
- [12] R. V. Mohite, M. Saxena, P. Kumar Sahoo, and P. Varma, "Implementing Advanced Analytics in Occupational Health for Real-Time Risk Assessment," *Heal. Leadersh. Qual. Life*, vol. 2, 2023, doi: 10.56294/hl2023242.
- [13] S. Sadeghi, N. Soltanmohammadlou, and F. Nasirzadeh, "Applications of Wireless Sensor Networks to Improve Occupational Safety and Health in Underground Mines," *J. Safety Res.*, vol. 83, pp. 8–25, 2022, doi: 10.1016/j.jsr.2022.07.016.
- [14] M. Theissen, L. Kern, T. Hartmann, and E. Clausen, "Use-Case-Oriented Evaluation of Wireless Communication Technologies for Advanced Underground Mining Operations," *Sensors*, vol. 23, no. 7, p. 3537, 2023, doi: 10.3390/s23073537.
- [15] S. Sumaryanto, S. Arif, O. Sinaga, Z. Zainuddin, and K. Kisno, "Implementation of Occupational Safety Training for Doctors At Ohs Training Center Medan," *J. Educ. Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 101–105, 2023, doi: 10.37081/ed.v11i2.4622.
- [16] Y. Xue, J. Wang, and J. Xiao, "Bibliometric Analysis and Review of Mine Ventilation Literature (2010–2023)," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e26133, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26133.