

Pendampingan Penerapan Inovasi Program HSE dalam Peningkatan Keselamatan Kerja di Industri Pertambangan

Muhammad Rizal¹, Juanto²

^{1,2}Program Studi Manajemen, Universitas Tidar
Jalan Kapten Suparman 39, Kota Magelang, Jawa Tengah, Indonesia 56116

Correspondence: mhdrzl@gmail.com

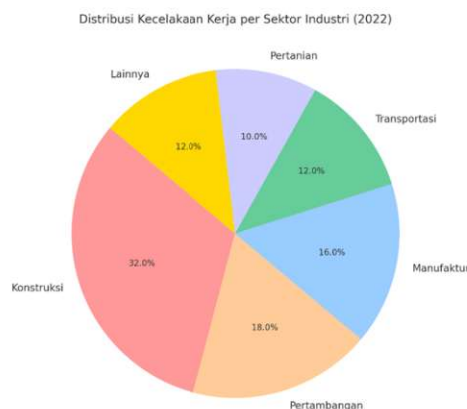
Received: 12 Sept 2025 – Revised: 26 Oct 2025 - Accepted: 01 Nov 2025 - Published: 30 Nov 2025

Abstrak. Industri pertambangan merupakan salah satu sektor dengan tingkat risiko kecelakaan kerja yang tinggi, sehingga penerapan program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) atau *Health, Safety, and Environment* (HSE) menjadi faktor kunci untuk mewujudkan kondisi kerja yang terlindungi dan optimal dalam kinerja. PT Freeport Indonesia merupakan salah satu perusahaan yang menghadapi tantangan serius dalam aspek keselamatan kerja, dengan sejumlah insiden kecelakaan yang masih tercatat meskipun telah mengimplementasikan sistem manajemen HSE secara komprehensif. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan program HSE tidak hanya bergantung pada sistem formal, tetapi juga pada inovasi yang mampu membentuk perilaku keselamatan pekerja secara lebih adaptif terhadap kondisi kerja berisiko tinggi. Studi ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana bentuk inovasi dalam program HSE, khususnya melalui pemanfaatan teknologi seperti *wearable device* dan sistem pelaporan digital, dapat mendukung peningkatan kesadaran dan perilaku keselamatan kerja. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur deskriptif-kualitatif dengan menganalisis referensi dari jurnal ilmiah, laporan keberlanjutan, dan dokumentasi insiden keselamatan kerja pada PT Freeport Indonesia dalam lima tahun terakhir. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan inovasi HSE dapat memperkuat pengawasan dan pemantauan real-time terhadap pekerja, meningkatkan kesiapsiagaan terhadap potensi bahaya, serta mendorong budaya kepatuhan prosedural. Namun demikian, efektivitas implementasi sangat dipengaruhi oleh kesiapan budaya organisasi, kualitas pelatihan, dan peran aktif manajemen. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan teknologi harus diintegrasikan secara holistik dengan pendekatan humanistik agar program HSE benar-benar adaptif dan berkelanjutan dalam konteks pertambangan Indonesia.

Kata kunci: Inovasi HSE, Industri Pertambangan, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), Studi Literatur

PENDAHULUAN

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3), atau *Health, Safety, and Environment* (HSE), merupakan aspek fundamental dalam menjaga keberlangsungan operasional, terutama pada industri dengan tingkat risiko tinggi seperti pertambangan. Sektor ini tercatat sebagai salah satu penyumbang tertinggi angka kecelakaan kerja di Indonesia. Penelitian oleh (Lestari et al., 2021) mengungkapkan bahwa pekerja di industri tambang menghadapi tantangan keselamatan yang kompleks, termasuk tekanan fisik dan risiko psikososial yang dapat memengaruhi konsentrasi dan perilaku kerja secara signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem keselamatan kerja tidak cukup hanya menyediakan alat pelindung atau SOP yang baku, melainkan harus memperhatikan kondisi mental dan kesejahteraan psikososial pekerja di lapangan. Ketika faktor-faktor ini diabaikan, maka risiko kecelakaan menjadi lebih besar, karena pekerja tidak dapat sepenuhnya fokus atau bereaksi dengan tepat dalam situasi yang berbahaya.



Gambar 1. Contoh gambar boxplot sebaran data pengabdian.

Gambar diatas menampilkan distribusi kecelakaan kerja berdasarkan sektor industri di Indonesia pada tahun 2022. Menurut laporan Kementerian Ketenagakerjaan RI (2022) dan BPJS Ketenagakerjaan, sektor konstruksi menjadi penyumbang terbesar kecelakaan kerja di Indonesia dengan angka 32%, disusul oleh sektor pertambangan 18%, dan sektor manufaktur 16%. Persentase ini menunjukkan bahwa sektor pertambangan merupakan salah satu sektor dengan tingkat risiko keselamatan kerja yang tinggi, terutama akibat karakteristik lingkungan kerja yang ekstrem, seperti area tambang bawah tanah, paparan gas beracun, suhu ekstrem, dan penggunaan alat berat dalam skala besar.

Menurut (Qarahasanlou et al., 2022), kegiatan pertambangan yang berlangsung di lingkungan geografis yang terpencil dan sensitif memiliki tantangan lingkungan yang serius, seperti degradasi tanah, polusi debu, erosi, dan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, pendekatan keberlanjutan dalam industri ini tidak dapat dilepaskan dari tanggung jawab sosial dan ekologi yang menyertainya.

PT Freeport Indonesia (PTFI), sebagai salah satu perusahaan tambang bawah tanah terbesar di dunia, beroperasi di wilayah pegunungan Papua yang sangat menantang secara geografis dan teknis. Meskipun telah menerapkan sistem manajemen HSE yang sesuai dengan standar global, insiden kecelakaan kerja masih terjadi (Widijanto et al., 2023). Fakta ini menunjukkan adanya kesenjangan antara sistem formal yang diterapkan dan efektivitas perubahan perilaku keselamatan di lapangan.

Dalam rangka meminimalkan potensi kecelakaan fatal, PTFI merancang program Manajemen Risiko Fatal (FRM) yang mulai diintegrasikan ke dalam sistem digital sejak 2020. Program ini ditujukan untuk meminimalisir potensi kecelakaan fatal melalui pengawasan kontrol kritis secara sistematis (Widijanto et al., 2023). Selain itu, PTFI juga mulai menerapkan konsep *smart mining*, dengan memanfaatkan teknologi berbasis big data

dan *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kondisi operasional dan kesehatan pekerja secara real-time (Tanoto, E. W., Syarief, R., & Indrawan, 2021). Pemanfaatan big data dan teknologi IoT memungkinkan pengembangan sistem keselamatan kerja yang lebih responsif dan didasarkan pada data nyata. Teknologi ini tidak hanya mencatat kejadian-kejadian, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi tindakan secara *real-time*, seperti memperingatkan ketika seseorang memasuki zona berbahaya atau ketika alat berat bekerja di dekat pekerja. Dengan demikian, sistem ini mempercepat respons dan mencegah insiden sebelum terjadi.

Namun demikian, efektivitas inovasi HSE sangat bergantung pada kesiapan budaya organisasi, partisipasi pekerja, dan kemampuan manajerial dalam mendorong penerapan teknologi tersebut secara konsisten. (Lestari et al., 2021) menekankan bahwa resistensi perilaku dan tekanan psikologis menjadi tantangan tersendiri dalam mengintegrasikan teknologi keselamatan di lingkungan kerja tambang.

Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk mengkaji penerapan inovasi dalam program HSE di industri pertambangan Indonesia, dengan fokus pada kasus PT Freeport Indonesia, serta sejauh mana pendekatan tersebut berkontribusi terhadap peningkatan perilaku keselamatan kerja. Melalui studi literatur, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dan praktis dalam mendesain program keselamatan kerja yang adaptif terhadap tantangan sektor pertambangan nasional. Demikian halnya dengan PT Freeport Indonesia, perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan/explorasi. Mengingat bahwa perusahaan bergerak di bidang pertambangan dengan risiko cukup tinggi, maka keselamatan, kesehatan dan lingkungan yang kondusif bukan lagi menjadi kewajiban yang harus dipenuhi, tetapi sudah merupakan kebutuhan Perusahaan (Taime & Abi, 2022). Pencegahan insiden terkait aspek kesehatan, keselamatan, lingkungan, dan energi juga memerlukan sistem manajemen yang terintegrasi secara menyeluruh. Sistem ini berupaya menciptakan lingkungan kerja yang sehat, menyenangkan, dan bebas dari kecelakaan, kerusakan, serta pemborosan melalui integrasi dan sinergi antara sumber daya manusia dan fasilitas yang dimiliki (Iqbal et al., 2021).

MASALAH

Sektor pertambangan di Indonesia tergolong sebagai industri dengan risiko kecelakaan kerja yang sangat tinggi. Insiden semacam ini tidak hanya mengancam keselamatan pekerja, tetapi juga berpotensi menghambat jalannya operasional perusahaan

serta mencoreng reputasi perusahaan di mata publik. PT Freeport Indonesia, sebagai salah satu perusahaan tambang multinasional terbesar di Indonesia, telah menerapkan berbagai sistem manajemen keselamatan kerja sesuai standar internasional. Namun, insiden kecelakaan kerja tetap terjadi, menunjukkan bahwa keberadaan sistem formal tidak serta-merta menjamin perubahan perilaku keselamatan di tingkat operasional. Hal ini mencerminkan adanya kesenjangan antara kebijakan keselamatan dan implementasi di lapangan, yang sebagian besar disebabkan oleh kurangnya kesadaran, kepatuhan, serta kemampuan pekerja dalam menyesuaikan diri dengan dinamika risiko kerja yang tinggi.

Tantangan utama dalam hal ini adalah merancang pendekatan HSE yang tidak sekadar bersifat administratif, tetapi mampu mendorong perubahan nyata dalam perilaku keselamatan kerja. Di sisi lain, kebutuhan untuk mengintegrasikan inovasi berbasis teknologi seperti *wearable device*, sistem pelaporan digital, dan analisis data real-time belum sepenuhnya dioptimalkan dalam mendukung perubahan perilaku keselamatan secara berkelanjutan. Masalah ini bersifat saintifik sekaligus aplikatif karena menyangkut pengembangan pendekatan manajemen keselamatan yang tidak hanya efektif secara sistem, tetapi juga relevan terhadap konteks budaya kerja, kesiapan teknologi, dan keterlibatan sumber daya manusia. Oleh karena itu, dibutuhkan analisis kritis terhadap peran inovasi dan *wearable device* ini dalam program HSE untuk menjawab tantangan perilaku keselamatan kerja di lingkungan industri pertambangan Indonesia. Selain itu, isu kesejahteraan pekerja pun menjadi dimensi penting dari masalah HSE di sektor pertambangan. Studi oleh (Amalia et al., 2024) mengungkapkan bahwa PT Freeport Indonesia pernah melakukan penghapusan status jaminan kesehatan BPJS secara sepihak terhadap ribuan pekerja melalui kebijakan furlough, tanpa prosedur hukum yang tepat. Tindakan ini tidak hanya melanggar regulasi nasional seperti Undang-Undang Nomor 40 Tahun 2004 tentang Sistem Jaminan Sosial Nasional, tetapi juga menimbulkan dampak sosial dan moral yang serius, termasuk kesulitan akses layanan kesehatan dan kematian akibat keterlambatan penanganan medis. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan program keselamatan kerja tidak bisa dilepaskan dari perlindungan sosial pekerja secara menyeluruh, yang menjadi fondasi penting dalam membangun budaya keselamatan dan kepercayaan antara pekerja dan manajemen (Amalia et al., 2024).

METODE PELAKSANAAN

Metode yang digunakan adalah review literature, di mana penelitian ini tidak menggunakan metode penelitian utama seperti pengumpulan data kuantitatif langsung maupun analisis statistik. Metode ini difokuskan pada pengumpulan, seleksi, dan sintesis informasi dari literatur relevan yang telah terpublikasi sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menarik kesimpulan dari data sekunder untuk memperoleh pemahaman yang mendalam tentang penerapan inovasi program HSE dalam meningkatkan perilaku keselamatan kerja di industri pertambangan Indonesia. Berikut adalah langkah-langkah metode review literature yang digunakan (Walenta et al., 2023):

1. Mencari dan mengumpulkan referensi literatur yang relevan dengan topik penelitian, khususnya yang berkaitan dengan HSE, teknologi *wearable*, perilaku keselamatan kerja, dan studi kasus di industri pertambangan seperti PT Freeport Indonesia.
2. Melakukan penyaringan dan seleksi referensi berdasarkan relevansi, kebaruan (minimal tahun 2020), serta keterkaitan langsung dengan variabel penelitian.
3. Melakukan analisis dan sintesis terhadap referensi yang terpilih dengan menekankan aspek inovasi dalam implementasi HSE dan pengaruhnya terhadap perilaku keselamatan kerja.
4. Melakukan telaah dan perbandingan dari berbagai jurnal nasional maupun internasional untuk mengidentifikasi kesamaan, perbedaan, serta gap penelitian.

Selain itu, penulis juga melakukan studi dokumentasi insiden keselamatan kerja yang dilaporkan oleh PT Freeport Indonesia, baik melalui laporan keberlanjutan perusahaan, dokumen audit K3, maupun publikasi berita industri yang dapat dipertanggungjawabkan. Studi ini juga membandingkan indikator keberhasilan program HSE yang dikembangkan oleh organisasi internasional seperti International Labour Organization (ILO) dan standar ISO 45001:2018.

Indikator keberhasilan inovasi program HSE dalam penelitian ini mengacu pada:

1. Indikator perubahan perilaku keselamatan kerja: peningkatan kepatuhan terhadap prosedur, penggunaan alat pelindung diri (APD), dan pelaporan near-miss.
2. Indikator teknologi inovatif HSE: pemanfaatan *wearable* device, sistem peringatan dini, dan pelaporan digital.
3. Indikator efektivitas operasional: penurunan angka kecelakaan kerja, peningkatan produktivitas kerja, dan efisiensi waktu operasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berbagai studi menunjukkan bahwa teknologi *wearable* secara signifikan meningkatkan pengawasan keselamatan pekerja tambang secara real-time. Perangkat seperti smartwatch dan *smart helmet* dilengkapi sensor kesehatan dan lingkungan yang terintegrasi ke dalam ekosistem IoT tambang. Sebagai contoh, (Lee et al., 2022) mengungkapkan bahwa helm pintar berperan sebagai penghubung utama dalam sistem IoT, dilengkapi dengan berbagai sensor yang mendukung aspek kesehatan dan keselamatan kerja. Demikian pula, (Liang et al., 2025) melaporkan bahwa sensor medis dan lingkungan miniatur telah terpasang pada helm, kacamata, jam tangan, dan lainnya, memungkinkan pemantauan elektrokardiogram, denyut nadi, kelelahan, gas beracun, suhu, dan kelembapan secara simultan.

Wearable juga efektif mendeteksi kelelahan pekerja tambang (Drews et al., 2023). mengembangkan aplikasi pada smartwatch yang mengukur waktu reaksi dan tingkat kelelahan subjektif operator tambang; hasilnya menunjukkan alat ini mampu mengukur reaksi operator dengan presisi tinggi dan mengaitkan pengukuran subjektif-objektif untuk memantau kelelahan secara komprehensif. Keunggulan pendekatan ini adalah biaya relatif rendah, kemudahan penggunaan, dan fungsi ganda yang meningkatkan keterlibatan pengguna.

Selain itu, perangkat *wearable* memungkinkan pelacakan keberadaan dan peringatan dini bahaya. Sebuah sistem peringatan kedekatan berbasis kacamata pintar menggunakan sinyal *Bluetooth* dari *beacon* pada alat berat dapat mengukur jarak dan mengirim peringatan visual kepada pejalan kaki di lokasi konstruksi/pertambangan. Hal ini mendemonstrasikan bahwa *wearable* ini sendiri dapat meningkatkan kewaspadaan pekerja terhadap kendaraan operasional di sekitarnya. Pemerintah dan industri juga menggunakan jaringan sensor nirkabel (*mesh network*) yang memanfaatkan perangkat *wearable* terpasang pada alat pelindung, misal lampu kepala untuk melacak pekerja underground secara *real time*. Laporan (Deloitte, 2024) menjelaskan penggunaan IoT *wearable* pada helm keras yang memungkinkan penelusuran lokasi pekerja, sehingga dapat mempercepat evakuasi jika terjadi longsor.

Dengan demikian, temuan literatur terkini menegaskan bahwa *wearable devices* (jam tangan pintar, helm pintar, kacamata pintar, rompi pintar, dll.) berperan dalam pemantauan kondisi fisiologis dan lingkungan sekaligus sebagai sistem peringatan dini. Integrasi

sensor-sensor tersebut ke infrastruktur smart mining meningkatkan kemampuan pendeteksian bahaya sebelum insiden terjadi. Sejumlah penelitian tentang helm pintar menyoroti perannya yang penting dalam memantau kesehatan pekerja serta situasi lingkungan kerja secara langsung dan terus-menerus. Tabel 1 memuat beberapa hasil penelitian terkait *wearable* di pertambangan:

Tabel 1. penelitian *wearable* di pertambangan

Penulis (Tahun)	Teknologi <i>Wearable</i>	Dampak terhadap Keselamatan Kerja
Drewe et al. (2023) (23)	Smartwatch dengan aplikasi penjejak kelelahan (waktu reaksi + KSS)	Memonitor kelelahan operator tambang secara akurat; biaya dan kemudahan tinggi, memfasilitasi manajemen kelelahan
Liang et al. (2025) (79)	Integrasi sensor medis dan lingkungan pada helm, kacamata, jam tangan, dll.	Pemantauan vital signs (denyut jantung, EEG, kelelahan) dan kondisi lingkungan (gas beracun, suhu, kelembapan) real-time
(Baek & Choi, 2020) (83)	Kacamata pintar ("proximity warning system") berbasis Bluetooth beacon	Peringatan kedekatan pejalan kaki dengan alat berat; meningkatkan kewaspadaan dan mengurangi potensi tabrakan di lokasi tambang
Lee et al. (2022) (52)	<i>Smart helmet IoT</i> dengan multi-sensor (lokasi, kesehatan, lingkungan)	Helm pintar sebagai <i>gateway IoT</i> ; mendukung <i>connected health and safety</i> dengan pemantauan berkelanjutan

Penerapan *Wearable Technology* di Industri Pertambangan:

Berbagai perusahaan tambang, baik di Indonesia maupun dunia, telah mulai menerapkan perangkat *wearable* sebagai bagian dari pelaksanaan program keselamatan dan kesehatan kerja. Sebagai contoh, PT Freeport Indonesia menekankan penggunaan teknologi digital mutakhir di lingkungan tambang bawah tanah berisiko tinggi, termasuk komunikasi nirkabel, sistem pemantauan seismik, dan aplikasi HSE berbasis IoT untuk meningkatkan keselamatan pekerja. Meskipun laporan akademik khusus Indonesia masih terbatas, prakarsa dari industri menyebutkan bahwa perusahaan seperti PT Adaro Indonesia dan PT Vale Indonesia telah mengeksplorasi penggunaan perangkat *wearable* (sensor tubuh, *wearable tracker*) serta drone untuk mendukung keselamatan tambang.

Dibandingkan dengan perusahaan lain, PT Freeport menempati posisi terdepan dalam digitalisasi pertambangan di Indonesia dan secara aktif mendorong pengembangan konsep

smart mining. Selain pemantauan jarak jauh yang telah dilakukan, Freeport merangkul teknologi *wearable* untuk kesehatan kerja (misalnya *wearable devices* untuk memantau paparan debu atau kelelahan). Sementara itu, perusahaan tambang lain umumnya masih dalam tahap awal adopsi, dengan fokus pada penerapan sensor dan automasi. Di pasar internasional, perusahaan perusahaan besar (seperti BHP, Rio Tinto) telah menggunakan *wearable devices* dalam program HSE mereka, mulai dari helm pintar ber-GPS dan gas detector terintegrasi hingga rompi pintar untuk mendeteksi postur tak aman.

Menurut (Yarahmadi et al., 2020), integrasi sistem manajemen Kesehatan, Keselamatan, Lingkungan, dan Energi (*HSE*) dengan delapan indikator strategis sangat penting untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan efisien. Dalam studi mereka, indikator “*do*” atau pelaksanaan menjadi prioritas tertinggi dalam efektivitas sistem, sedangkan tindakan korektif dan perbaikan berkelanjutan justru menjadi titik terlemah karena lemahnya evaluasi dan tindak lanjut di unit pelaksana. Temuan ini menunjukkan pentingnya komitmen organisasi dalam implementasi nyata di lapangan, bukan hanya pada perencanaan dan kebijakan tertulis.

Prabowo et al (2022), menemukan bahwa keselamatan dan kesehatan kerja berkontribusi signifikan terhadap produktivitas. Dalam konteks industri energi, penerapan K3 yang baik menyumbang peningkatan kinerja karyawan hingga hampir 75%, yang membuktikan bahwa investasi pada sistem keselamatan bukan hanya bentuk kepatuhan, melainkan juga menjadi pendekatan strategis dalam bisnis untuk mendorong efisiensi operasional dan semangat kerja karyawan.

Kelemahan dan Tantangan Teknologi Wearable dalam HSE

Meskipun *wearable devices* menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan keselamatan kerja, beberapa keterbatasan berikut juga penting untuk dicermati:

A. Biaya Implementasi Awal

Implementasi perangkat *wearable* berbasis IoT dengan fitur sensor canggih menuntut pengeluaran investasi yang besar di tahap awal (Lee et al., 2022). Perusahaan harus mempersiapkan infrastruktur jaringan nirkabel di area tambang, sistem pemrosesan data, hingga pelatihan pekerja.

B. Ketergantungan pada Koneksi Stabil

Lingkungan pertambangan bawah tanah seringkali tidak memungkinkan sinyal stabil untuk komunikasi data real-time. Hal ini membatasi efektivitas sistem pemantauan wearable (Liang et al., 2025).

C. Potensi Gangguan atau False Alarm

Beberapa sistem sensor yang terlalu sensitif dapat memunculkan notifikasi bahaya yang berlebihan (false positive), yang justru mengganggu konsentrasi pekerja. (Gaetani et al., 2020).

D. Penerimaan Budaya Organisasi

Karyawan mungkin menganggap wearable sebagai bentuk “pengawasan” berlebihan. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi sangat bergantung pada pendekatan manajemen dalam membangun trust (Tanoto, E. W., Syarief, R., & Indrawan, 2021).

Sudut Pandang Humanistik dan Adaptif

Selain pendekatan teknologi, faktor psikososial dan budaya keselamatan kerja tetap menjadi komponen yang tidak bisa diabaikan. Studi (Lestari et al., 2021) menunjukkan bahwa kondisi mental, tekanan kerja, dan motivasi intrinsik memiliki pengaruh signifikan terhadap kepatuhan pekerja terhadap SOP K3, bahkan ketika sistem teknologi canggih sudah tersedia.

Maka, wearable harus diintegrasikan sebagai bagian dari strategi keseluruhan perubahan budaya kerja, bukan sebagai solusi tunggal.

KESIMPULAN

Penerapan teknologi *wearable* dalam program HSE pada industri pertambangan, khususnya di PT Freeport Indonesia, terbukti mampu memperkuat pengawasan keselamatan pekerja melalui pemantauan fisiologis dan lingkungan secara *real-time* (Lee, Kim, & Park, 2022; Liang et al., 2025). *Wearable devices*—mulai dari *smart helmet* hingga *smartwatch*—memberikan peringatan dini terhadap kelelahan dan bahaya gas, sehingga secara signifikan menurunkan risiko kecelakaan berbasis kelelahan dan tabrakan peralatan (Drews et al., 2023). Namun, efektivitas teknologi ini masih terhambat oleh biaya implementasi tinggi, ketergantungan pada infrastruktur jaringan yang stabil, false alarm, serta resistensi budaya organisasi terhadap pengawasan digital (Liang et al., 2025; Tanoto, Syarief, & Indrawan, 2021). Oleh karena itu, integrasi *wearable technology* harus disertai upaya penguatan budaya keselamatan, pelatihan berkelanjutan, dan partisipasi aktif pekerja

agar adopsinya tidak hanya teknis tetapi juga humanistik (Lestari, Pramono, & Rachman, 2021). Rekomendasi bagi PT Freeport dan perusahaan tambang lain adalah menyusun kerangka implementasi yang menggabungkan wearable dengan program manajemen risiko fatal digital dan evaluasi berkala dampak perilaku, serta mengkaji model bisnis berkelanjutan untuk menekan biaya jangka panjang. Dengan pendekatan holistik tersebut, wearable technology dapat menjadi pilar strategis dalam meningkatkan keselamatan dan efektivitas operasional pertambangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, F., Vratista, I., Az-Zahra, F., & Wulandari, H. (2024). *Kasus Pelanggaran K3 di PT Freeport Indonesia: Analisis Penghapusan Status Jaminan Kesehatan BPJS dan Dampaknya pada Karyawan*. June. https://www.researchgate.net/publication/381651116_Kasus_Pelanggaran_K3_di_PT_Freeport_Indonesia_Analisis_Penghapusan_Status_Jaminan_Kesehatan BPJS_dan_Dampaknya_pada_Karyawan?enrichId=rgreq-b133f4eed2f9deb9c67a8f6887ed51a4-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdI0z
- Baek, J., & Choi, Y. (2020). Smart Glasses–Based Personnel Proximity Warning System for Improving Pedestrian Safety in Construction and Mining Sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1422. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041422>
- Deloitte. (2024). *Mining & metals industry: Innovation with smart safety technologies*. <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/energy-and-resources/articles/smart-safety-mining.html>
- Drews, F. A., Schmidt, K., Bennett, B., & Sieber, W. K. (2023). Fatigue assessment in mining using smartwatch applications: Comparing objective and subjective metrics. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 20(2), 112–122. <https://doi.org/10.1080/15459624.2022.2148954>
- Gaetani, P., Rossi, B., Mancini, S., & Buhagiar, V. (2020). Incorporating Worker Awareness in the Generation of Hazard Proximity Warnings. *Automation in Construction*, 113, 103133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103133>
- Iqbal, S. M. A., Mahgoub, I., Du, E., Leavitt, M. A., & Asghar, W. (2021). Advances in healthcare wearable devices. *Npj Flexible Electronics*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00107-x>
- Lee, S. J., Kim, Y. H., & Park, J. H. (2022). Smart helmet for real-time monitoring of miners using Internet of Things (IoT) sensors. *IEEE Access*, 10, 56789–56798. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169824>
- Lestari, K. S., Pramono, D., & Rachman, I. (2021). Psychosocial Risk Factors on Mining Workers Processing Copper and Gold Minerals during Covid-19 Pandemic. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 10(3), 309–315. <https://doi.org/10.20473/ijosh.v10i3.2021.309-315>
- Liang, Y., Cao, X., Zhang, W., Liu, L., & Zhan, Y. (2025). Wearable health monitoring

- system integrated with multi-sensor for underground mining safety. *Safety Science*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106147>
- Qarahasanlou, A. N., Khanzadeh, D., Shahabi, R. S., & Basiri, M. H. (2022). Introducing sustainable development and reviewing environmental sustainability in the mining industry. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 37(4), 91–108. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.8>
- Taime, H., & Abi, A. (2022). Analisis Program Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Dalam Upaya Meningkatkan Kinerja Karyawan Pada Departemen Facilities Manajemen Pt. Freeport Indonesia Kabupaten Mimika Papua. *Jurnal Kritis*, 6(1), 45–69.
- Tanoto, E. W., Syarief, R., & Indrawan, R. D. (2021). *Model Manajemen Kinerja Sustainable Safe Production di Deep Mill Level Zone PT Freeport Indonesia*. Institut Pertanian Bogor.
- Yarahmadi, R., Moridi, H., Farshad, A. A., Taheri, F., & Jebeli, M. B. (2020). Weighing and prioritizing the eight principles of integrated health, safety, environment and energy management in industries covered by the ministry of industry, mining and trade. *Iran Occupational Health*, 17(1).