



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

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

Vol. 4 No. 2 (2025) pp: 6611-6623

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

Identifikasi Kecelakaan Kerja Tambang Batu Bara Sawahlunto Berbasis JSA dan FTA

Imaduddin Bahtiar Efendi¹, Rifqi Ady Ramadhani², Silvi Agustina³, Sebastian Awan Agustinus⁴, Syahrul Rahmadtulloh Putra Solikin⁵.

^{1,2,3,4,5} Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Islam Majapahit

¹imaduddin@unim.ac.id, ²radyramadhani@unim.ac.id, ³sagustina.2022@unim.ac.id, ⁴sawanagustinus.2024@unim.ac.id, ⁵srahmadtullohputra.2024@unim.ac.id.

Abstrak

Penelitian ini membahas analisis penyebab kecelakaan kerja di tambang batu bara Sawahlunto dengan memanfaatkan metode Job Safety Analysis (JSA) dan Fault Tree Analysis (FTA). Pendekatan JSA dimanfaatkan untuk mendeteksi potensi risiko pada enam tahap aktivitas penting seperti pemasangan penyangga tambang dan pemeriksaan geologi, sedangkan FTA digunakan untuk memetakan hubungan sebab-akibat secara sistematis sehingga akar penyebab kecelakaan dapat teridentifikasi dengan jelas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecelakaan kerja di tambang bukan hanya disebabkan oleh satu faktor, melainkan gabungan dari kegagalan teknis dan lemahnya aspek manajemen, seperti kegagalan struktur tambang, tidak berfungsinya sistem peringatan dini, serta kurangnya pengawasan K3 di lapangan. Temuan ini menunjukkan pentingnya penerapan pemantauan geoteknik secara berkala, pemasangan sensor tanah dan alarm peringatan, penerapan SOP yang konsisten, serta pelatihan keselamatan untuk pekerja tambang. Rekomendasi dari penelitian ini diharapkan dapat membantu menciptakan budaya keselamatan kerja yang baik serta mendukung upaya zero accident di sektor pertambangan. Penelitian ini juga diharapkan menjadi referensi dalam perbaikan sistem K3 dan mendukung transformasi pertambangan berbasis teknologi untuk meminimalkan risiko kecelakaan secara berkelanjutan.

Kata kunci: Kecelakaan, Tambang, Batu bara, Sawahlunto, JSA, FTA.

1. Latar Belakang

Transformasi digital pada fase industri 4.0 di tengah arus globalisasi mengharuskan adanya strategi inovatif guna mencapai tingkat kesejahteraan sosial yang mapu bertahan dalam jangka waktu panjang [1]. Hal ini karena Persaingan global yang terjadi saat ini menuntut perusahaan untuk senantiasa menjaga kestabilan kualitas produk, dan salah satu cara agar kualitas produk tetap stabil adalah dengan menjaga kesehatan fisik dan mental karyawan [2].

Selama kehidupan manusia masih berlangsung, aktivitas pertambangan diperkirakan akan terus berlanjut, mengingat peranannya yang krusial dalam menyediakan bahan baku untuk kebutuhan dasar hingga perkembangan teknologi modern. Sumber daya mineral dan logam hasil pertambangan menjadi komponen utama dalam berbagai sektor, mulai dari konstruksi, energi, transportasi, hingga industri digital. Meskipun memiliki kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi dan pembangunan, industri ini juga memiliki potensi risiko tinggi terhadap keselamatan pekerja. Oleh karena itu, penerapan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) serta pendekatan pembangunan berkelanjutan menjadi hal yang esensial guna mengurangi dampak negatif terhadap manusia dan lingkungan.

Penerapan K3 yang baik menjadi tanggung jawab bersama antara perusahaan, pekerja, dan pemerintah untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja serta penyakit akibat kerja. Sistem K3 yang efektif tidak hanya melindungi pekerja dari risiko kecelakaan dan cedera, tetapi juga berkontribusi terhadap kelancaran operasional perusahaan dan keberlanjutan industri. Dengan demikian perusahaan juga dihadapkan pada tantangan untuk menciptakan lingkungan kerja yang inklusif, di mana latar belakang budaya, gender, dan pengalaman yang berbeda dapat memberikan kontribusi maksimal terutama dalam mengurangi terjadinya kecelakaan kerja [3].

Bahaya kesehatan kerja di tempat kerja dapat secara umum dikategorikan ke dalam beberapa kelompok. Bahaya ini dapat disebabkan oleh faktor fisik, kimia, biologi, ergonomi, atau kecelakaan. Tantangan utama dalam hal kesehatan dan keselamatan kerja di tempat kerja adalah meningkatnya persaingan global, yang bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan, yang akibatnya mengakibatkan meningkatnya bahaya kesehatan. Kemiskinan dan buta huruf yang berlaku di antara pekerja juga merupakan faktor utama yang bertanggung jawab atas bahaya di tempat kerja [4].

Manusia merupakan salah satu faktor penting sebagai sumber tenaga di dalam suatu sistem proses produksi [5]. Faktor manusia memegang peran dominan dalam insiden kecelakaan tambang batubara, dengan kontribusi lebih dari 97% sebagai penyebab langsung terjadinya kecelakaan. Identifikasi dan klasifikasi faktor manusia melalui pendekatan HFACS dan analisis korelasi abu-abu memberikan arah prioritas intervensi pencegahan yang efektif dalam upaya mencapai zero accident di sektor pertambangan [6]. Dari sudut pandang manusia dalam konteks human factors design proses produksi merupakan salah satu bagian terpenting didalam proses manufaktur karena melibatkan beberapa aspek penting untuk mendukung kelancaran proses produksi tersebut. (2) Salah satu aspek penting tersebut adalah sistem kerja, untuk memaksimalkan proses produksi perlu memperhatikan sistem kerja yang baik melalui perancangan yang nyaman, aman, efektif, efisien dan perilaku yang terampil [7].

Dari sudut pekerja harus bekerja secara ekstra karena harus mengangkat beban secara manual [8]. Risiko yang sering terjadi adalah, Gangguan muskuloskeletal yang terkait dengan pekerjaan (WMSDs) terutama dalam pekerjaan yang melibatkan pengangkutan material secara manual di industri manufaktur [9]. Dalam industri berisiko tinggi seperti pertambangan, K3 menjadi landasan utama dalam upaya meminimalisir insiden yang dapat menimbulkan kerugian besar dari sisi manusia, aset, maupun lingkungan [10], serta membantu pencapaian tujuan kerja [11]. Perilaku tidak aman pekerja, kurangnya organisasi manajemen, dan lemahnya kepemimpinan keselamatan juga menjadi faktor manusia paling dominan yang memicu kecelakaan tambang batubara. Analisis korelasi abu-abu menunjukkan hubungan erat antara faktor-faktor tersebut dengan tingkat kecelakaan, menjadikannya area fokus penting dalam penerapan sistem K3 pertambangan [6]. Di sisi lain faktor

Pertambangan batu bara merupakan industri dengan tingkat risiko yang sangat tinggi, di mana berbagai bahaya operasional dapat mengancam kesehatan dan keselamatan kerja. Pihak yang paling rentan terhadap risiko tersebut adalah para pekerja tambang yang beraktivitas langsung di area berbahaya. Sebagai contoh, runturan lereng tambang tidak hanya mengancam keselamatan para pekerja, tetapi juga dapat menimbulkan dampak bagi masyarakat yang tinggal di sekitar lokasi tambang. Sebaliknya, insiden seperti paparan gas beracun atau ledakan di dalam tambang pada umumnya hanya membahayakan keselamatan para pekerja yang berada di area tambang tersebut. Pertambangan batubara selain memberi sisi positif, juga menimbulkan sisi negatif berupa kerusakan atau pencemaran lingkungan baik air, darat, dan udara, kebisingan, serta konflik sosial yang dapat memperburuk kondisi masyarakat sekitar tambang [12].

Metode *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) adalah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menganalisis penyebab kecelakaan, serta merumuskan langkah pengendalian risiko secara sistematis. Dengan menerapkan metode *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA), diharapkan dapat dilakukan upaya pencegahan dan pengurangan terjadinya kecelakaan kerja di perusahaan tambang batu bara di Sawahlunto, serta menghindari dan menanggulangi risiko tersebut dengan langkah pengendalian yang tepat [13].

Program keselamatan kerja pada kegiatan penambangan batu bara, khususnya di Sawahlunto, di buat dan terapkan sebagai upaya untuk mencegah berbagai risiko kecelakaan, mulai dari ledakan, runturan lereng, paparan gas berbahaya, hingga kegagalan sistem evakuasi. Berbagai kejadian berbahaya tersebut bukan hanya mengancam keselamatan jiwa para pekerja, tetapi juga dapat menghambat jalannya produksi dan menimbulkan kerugian besar bagi perusahaan. Saya melihat bahwa beberapa faktor utama penyebab kecelakaan di tambang ini antara lain adalah desain tambang yang kurang optimal, kelalaian dalam menjalankan prosedur kerja, lemahnya pengawasan, serta kurangnya pelatihan K3 bagi pekerja. Karena itu, program keselamatan ini saya rancang dengan mengacu pada peraturan perundang-undangan, kebijakan perusahaan, kebutuhan operasional, dan prinsip manajemen risiko, dengan tujuan untuk menumbuhkan budaya kerja yang lebih aman dan bertanggung jawab di lingkungan tambang batu bara [10].

Salah satu penelitian terdahulu terkait dengan tambang batubara diantaranya adalah analisis risiko runturan atap tambang batubara bawah tanah dengan distribusi probabilitas memungkinkan perusahaan mengevaluasi apakah

diperlukan perbaikan sistem penyangga untuk menurunkan potensi kecelakaan kerja. Penelitian Duzgun dan Einstein (2004) menunjukkan bahwa pendekatan risk and decision analysis penting untuk mengevaluasi probabilitas dan dampak runtuhnya atap tambang, sehingga perusahaan dapat menetapkan langkah mitigasi berbasis risiko guna mengurangi potensi kecelakaan dan kerugian operasional [14].

Penulis tertarik untuk melakukan analisis risiko bahaya pada kegiatan penambangan batu bara di Sawahlunto dengan menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengetahui potensi bahaya pada setiap tahapan kerja serta menelusuri akar penyebab kecelakaan yang terjadi. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengendalian risiko yang sudah diterapkan di lapangan, serta mengkaji sejauh mana sistem keselamatan kerja di tambang batu bara tersebut berjalan dengan baik. Selain itu, hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan masukan berupa rekomendasi perbaikan sistem

keselamatan kerja yang lebih efektif, sehingga dapat meningkatkan budaya keselamatan di lingkungan mendukung upaya pencegahan kecelakaan kerja dan tambang

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA), yaitu serangkaian proses untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang dapat terjadi dalam aktivitas rutin maupun non-rutin di perusahaan, kemudian menganalisis akar penyebab kecelakaan, serta menyusun program pengendalian bahaya agar dapat meminimalkan tingkat risiko ke level yang lebih rendah [15]. FTA dikembangkan dengan logika deduktif atau ‘top-down’, dimulai dari kejadian tidak diinginkan (*TOP event*), lalu dianalisis semua penyebab langsung dan hubungannya, hingga diperoleh kejadian dasar (*basic event*) [16].

Selain itu *Fault Tree Analysis* (FTA) adalah teknik untuk mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor yang dapat menyebabkan suatu kejadian yang tidak diinginkan. Alat ini merupakan metode interpretasi grafis yang menggunakan simbol-simbol khusus untuk menggambarkan hubungan logis antara peristiwa dan sebab-akibat. Metode ini menggunakan simbol kejadian dan simbol logika. *AND Gate* digunakan ketika semua kejadian input harus terjadi agar kejadian output dapat terjadi. *OR Gate* digunakan ketika satu kejadian input cukup untuk memicu kejadian output [17]. FTA dimulai dengan menganalisis kecelakaan atau kesalahan tertentu, kemudian dilanjutkan dengan menganalisis setiap lapisan hingga menemukan penyebab dasar kecelakaan yang memenuhi persyaratan penelitian [18].

Metode JSA dianggap efektif untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi bahaya, termasuk di industri berat seperti pertambangan, dengan cara yang sistematis [19]. Penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) terbukti menjadi alat efektif dalam meningkatkan keselamatan kerja di pertambangan dengan cara mengidentifikasi dan mengendalikan potensi bahaya pada setiap langkah pekerjaan, sehingga dapat mengurangi insiden kecelakaan kerja dan meningkatkan budaya keselamatan di lingkungan tambang. Selain dapat membantu mengintegrasikan prinsip keselamatan ke dalam prosedur kerja tambang, mengidentifikasi potensi bahaya, dan meningkatkan kesadaran pekerja terhadap risiko di area kerja, pelaksanaan JSA secara rutin terbukti dapat meminimalkan kecelakaan kerja pada area risiko tinggi seperti peledakan dan kelistrikan di tambang. Hal ini karena menekankan pentingnya keterlibatan pekerja dalam penerapan JSA untuk memastikan kontrol risiko berjalan efektif dan meningkatkan budaya keselamatan di tambang [20].

Metode pengambilan data pada rencana penelitian ini dimulai dari tahap pendahuluan, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, tahap penyusunan laporan penelitian, serta tahap seminar dan evaluasi.

2.1. Tahap pendahuluan

Tahap awal dimulai dengan membaca literatur untuk memahami konsep dan teori yang berhubungan dengan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), serta prinsip penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) dalam menganalisis kecelakaan kerja. Studi literatur ini mencakup undang-undang mengenai Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) yang berlaku, standar operasional prosedur (SOP) di sektor pertambangan, serta temuan dari penelitian sebelumnya yang terkait. Pada tahapan ini juga dilakukan pengenalan awal terhadap aktivitas kerja yang berisiko tinggi di lokasi penelitian, yang akan digunakan sebagai landasan untuk merumuskan fokus permasalahan dan menyusun rencana metode pengumpulan data.

2.2. Tahap Pengumpulan data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi literatur yang diperoleh dari jurnal ilmiah, artikel berita, laporan kecelakaan tambang, dan dokumen terkait keselamatan kerja di industri pertambangan. Data yang dikumpulkan meliputi informasi tentang tahapan aktivitas kerja, potensi bahaya, kronologi kecelakaan, dan tindakan pengendalian risiko yang telah diterapkan dalam berbagai kasus serupa. Data ini digunakan sebagai dasar penyusunan tabel *Job Safety Analysis* (JSA) dan diagram *Fault Tree Analysis* (FTA) dalam rangka menganalisis bahaya dan penyebab kecelakaan kerja pada aktivitas pertambangan batubara.

2.3. Tahap Pengolahan Data

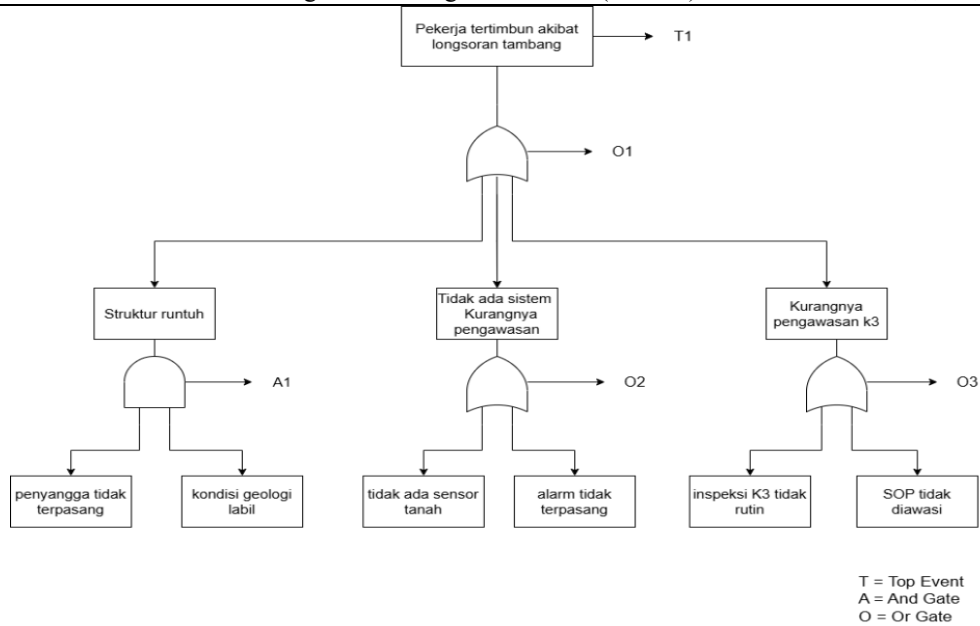
Pada tahap ini, data yang diperoleh melalui studi pustaka, dokumen referensi, dan artikel berita yang dianalisis menggunakan pendekatan *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA).

Langkah awal dalam pengolahan data adalah memetakan aktivitas kerja berdasarkan urutan aktivitas di area pertambangan. Setiap tahapan pekerjaan kemudian dianalisis menggunakan metode JSA untuk mengidentifikasi potensi bahaya, penyebab, dan tindakan pengendalian. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel JSA.

Tabel 2. 1 *Job Safety Analysis* (JSA)

No	Langkah Kerja	Potensi Bahaya	Dampak	Pengendalian Bahaya
1	Pemasangan penyangga tambang	Penyangga tidak terpasang	Struktur runtuh, pekerja tertimpa	Pemasangan penyangga sesuai standar, inspeksi pemasangan, supervisi teknis ketat
2	Pemeriksaan kondisi geologi tambang	Kondisi geologi labil tidak terdeteksi	Longsor mendadak	Survei geoteknik rutin, analisis stabilitas tanah, konsultan geoteknik independen
3	Pemasangan sistem monitoring tanah	Tidak ada sensor tanah	Tidak ada peringatan dini longsor	Pasang sensor pergerakan tanah, inspeksi dan kalibrasi sensor rutin
4	Pemasangan alarm peringatan	Alarm tidak terpasang / tidak berfungsi	Tidak ada peringatan, gagal evakuasi	Pasang alarm darurat, uji fungsi alarm secara berkala, SOP alarm darurat
5	Inspeksi dan pengawasan K3	Inspeksi K3 tidak rutin	Bahaya tidak terdeteksi	Jadwal inspeksi K3 berkala, dokumentasi hasil inspeksi, audit internal & eksternal
6	Penerapan SOP K3	SOP tidak diawasi atau dilanggar	Prosedur keselamatan tidak efektif	Sosialisasi SOP, pengawasan pelaksanaan SOP, sanksi pelanggaran SOP

Selanjutnya, tahapan pekerjaan atau aktivitas yang diidentifikasi memiliki potensi kecelakaan atau risiko tertinggi dipilih untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode FTA. FTA dilakukan untuk menelusuri akar penyebab kecelakaan dengan memetakan hubungan sebab akibat antara top event dan basic event secara sistematis.



Gambar 2. 1 Diagram *Fault Tree Analysis (FTA)*

Setelah pembuatan diagram *Fault Tree Analysis (FTA)*, dilakukan penyusunan struktur FTA dalam bentuk tabel untuk memperjelas hubungan antara *top event*, faktor penyebab, jenis logika hubungan (*gate*), serta potensi bahaya dan upaya pengendaliannya.

Tabel ini mempermudah pemahaman terhadap jalur penyebab kecelakaan secara sistematis dan menjadi dasar dalam menyusun rekomendasi pengendalian risiko di area tambang.

Tabel 2.2 Struktur *Fault Tree Analysis (FTA)*

Level	Event / Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya Dampak	/ Pengendalian Bahaya
Top Event	Pekerja tertimbun akibat longsoran tambang	OR Gate	Struktur runtuh; Tidak ada sistem peringatan; Kurangnya pengawasan K3	Pekerja tertimbun, cedera kematian	Gabungan seluruh kontrol di bawah
Struktur runtuh	Struktur tambang gagal	AND Gate	Penyangga tidak terpasang; Kondisi geologi labil	Struktur runtuh, pekerja tertimpa	Pemasangan penyangga sesuai standar; inspeksi pemasangan; supervisi teknis ketat
Tidak ada sistem peringatan	Sistem memberi peringatan gagal	OR Gate	Tidak ada sensor tanah; Alarm tidak terpasang	Tidak ada peringatan, gagal evakuasi	Pasang sensor tanah, kalibrasi rutin; pasang alarm, uji fungsi alarm
Kurangnya pengawasan K3	Sistem pengawasan lemah	OR Gate	Inspeksi K3 tidak rutin; SOP tidak diawasi	Bahaya tidak terdeteksi,	Jadwal inspeksi berkala; audit K3;

Level	Event / Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya Dampak	/	Pengendalian Bahaya
				prosedur tidak efektif		sosialisasi SOP; pengawasan ketat

Setelah struktur FTA dijelaskan melalui diagram dan tabel, langkah selanjutnya adalah melakukan komparasi antara hasil analisis JSA dan FTA. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh terhadap potensi bahaya, dampak kecelakaan, serta efektivitas pengendalian risiko dari dua pendekatan yang digunakan.

Dengan membandingkan hasil dari metode JSA dan FTA, dapat dilihat sejauh mana keterkaitan antara tahapan pekerjaan yang berisiko tinggi dan akar penyebab kecelakaan kerja secara sistematis. Perbandingan ini juga membantu dalam menentukan prioritas tindakan pengendalian yang harus diterapkan di lapangan untuk mencegah insiden berulang.

Tabel 2.3 Perbandingan *Job Safety Analysis (JSA)* dan *Fault Tree Analysis (FTA)*

No	Langkah Kerja	Potensi Bahaya	Dampak	Pengendalian Bahaya
1	Pemasangan penyangga tambang	Penyangga tidak terpasang	Struktur runtuh, pekerja tertimpa	Pemasangan sesuai standar, inspeksi, supervisi ketat
2	Pemeriksaan kondisi geologi	Kondisi labil geologi tidak terdeteksi	Longsor mendadak	Survei geoteknik, analisis stabilitas, konsultan
3	Pemasangan sistem monitoring tanah	Tidak ada sensor tanah	Tidak ada peringatan dini	Pasang sensor, kalibrasi rutin
4	Pemasangan alarm peringatan	Alarm tidak terpasang / rusak	Gagal evakuasi	Pasang alarm, uji fungsi, SOP alarm
5	Inspeksi dan pengawasan K3	Inspeksi rutin tidak	Bahaya terdeteksi tidak	Jadwal inspeksi, dokumentasi, audit
6	Penerapan SOP K3	SOP tidak diawasi	Prosedur efektif tidak	Sosialisasi SOP, pengawasan, sanksi

2.4. tahap penyajian data

Hasil penelitian yang disusun berdasarkan studi literatur dipaparkan dalam bentuk laporan akhir. Laporan ini memuat analisis potensi bahaya, penyebab kecelakaan, serta langkah pengendalian yang dirumuskan berdasarkan kajian literatur dan data sekunder. Penyusunan laporan dilakukan secara sistematis agar dapat menjadi referensi perbaikan sistem keselamatan kerja pada kegiatan penambangan batu bara.

3. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis potensi bahaya, penyebab kecelakaan, dan langkah pengendalian risiko pada kegiatan penambangan batu bara di Sawahlunto. Fenomena kecelakaan kerja yang menjadi fokus penelitian terjadi di salah satu lokasi tambang batu bara di Sawahlunto, Sumatera Barat, di mana dilaporkan insiden pekerja tertimbun runtuh material tambang. Peristiwa ini menegaskan pentingnya evaluasi sistem keselamatan kerja melalui metode *Job Safety Analysis* (JSA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) agar akar penyebab kecelakaan dapat diidentifikasi dan tindakan pencegahan yang tepat dapat dirumuskan. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi perbaikan untuk mendukung upaya zero accident di sektor pertambangan batu bara.

3.1. fenomena kecelakaan kerja

Kegiatan penambangan batu bara di Sawahlunto, Sumatera Barat, memiliki tingkat risiko kecelakaan kerja yang cukup tinggi. Salah satu kejadian serius terjadi pada Desember 2022, ketika ledakan gas metana mengakibatkan 10 pekerja meninggal dunia dan beberapa lainnya mengalami luka-luka.



Ledakan ini diduga kuat dipicu oleh akumulasi gas metana yang tidak terbuang akibat sistem ventilasi yang tidak berfungsi optimal. Selain itu, tidak adanya sistem deteksi gas otomatis dan lemahnya pemantauan kadar gas di area kerja turut memperparah keadaan. Peristiwa ini menandakan adanya kelalaian dalam penerapan standar operasional prosedur (SOP) keselamatan serta kurangnya pengawasan terhadap infrastruktur tambang yang seharusnya rutin diperiksa.

Pencegahan dan pengendalian kecelakaan akibat ledakan gas adalah langkah penting untuk meningkatkan keselamatan kerja di tambang Batubara. Menurut hasil penelitian terdahulu, ledakan gas merupakan penyebab paling mematikan di tambang, menyumbang lebih dari 25% kematian akibat kecelakaan tambang sejak 2015 [21].

Ada juga hasil penelitian yang menyebutkan bahwa ledakan di area pertambangan batubara pada umumnya disebabkan oleh gabungan beberapa faktor yang saling berkaitan. Penyebab utamanya berasal dari penumpukan batubara yang tidak terkendali, terutama saat batubara menumpuk di jalur balik udara. Kondisi ini menciptakan lingkungan yang sangat mudah meledak. Selain itu, ledakan listrik dan kerusakan isolasi akibat peralatan yang sudah tua juga meningkatkan risiko terjadinya ledakan. Sementara itu, ledakan gas tambang biasanya dipicu oleh empat kejadian dasar yang memiliki pengaruh besar, yaitu kegagalan mendeteksi kebocoran gas secara tepat waktu, keterlambatan penanganan indikasi bahaya, kebakaran akibat proses pengelasan dengan menggunakan gas listrik, dan sistem ventilasi yang tidak memadai atau tidak berfungsi. Jika faktor-faktor tersebut tidak ditangani secara preventif, maka potensi terjadinya ledakan besar di lingkungan pertambangan batubara akan semakin meningkat [22].

Di awal 2025, kecelakaan kembali terjadi di lokasi tambang yang sama, di mana seorang pekerja tertimpa reruntuhan dinding lubang tambang dan berhasil dievakuasi dalam keadaan kritis.



Runtuhan tersebut menunjukkan kegagalan pada sistem penyangga tambang, yang kemungkinan besar tidak terpasang sesuai standar atau tidak cukup kuat menahan beban. Minimnya pemantauan geoteknik, seperti absennya sensor pergerakan tanah, serta kurangnya inspeksi rutin terhadap struktur tambang memperjelas bahwa kontrol keselamatan belum berjalan secara maksimal. Yang lebih memprihatinkan, proses evakuasi dilakukan tanpa pelibatan tim SAR atau otoritas terkait, menandakan lemahnya kesiapan penanganan darurat oleh pihak perusahaan.

Rangkaian insiden ini menggambarkan bahwa akar penyebab kecelakaan di sektor pertambangan Sawahlunto tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga sistemik, menyangkut lemahnya implementasi sistem keselamatan kerja secara menyeluruh. Oleh karena itu, peningkatan standar keselamatan harus dilakukan secara terintegrasi.

3.2. Analisis *Job Safety Analysis (JSA)*

Job Safety Analysis (JSA) merupakan metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya dalam setiap tahapan pekerjaan, sekaligus menyusun langkah-langkah pengendalian untuk mencegah kecelakaan kerja. Dalam konteks penambangan batu bara di Sawahlunto, metode ini diaplikasikan untuk memetakan enam aktivitas utama yang memiliki risiko signifikan terhadap keselamatan pekerja.

Hasil analisis JSA telah disajikan sebelumnya dalam Tabel 2.1, yang memuat enam langkah kerja utama berikut potensi bahaya, dampak kecelakaan, serta bentuk pengendalian yang dapat diterapkan. Berikut ini adalah pembahasan rinci dari setiap tahapan kerja berdasarkan hasil tersebut.

1. **Pemasangan Penyangga Tambang**

Langkah kerja ini merupakan salah satu aktivitas paling krusial dalam menjamin kestabilan struktur tambang bawah tanah. Potensi bahaya utama yang teridentifikasi adalah penyangga yang tidak terpasang, baik secara teknis maupun kelengkapan. Ketidakterpasangan ini dapat mengakibatkan struktur tambang runtuh, yang berisiko besar menimpa pekerja dan menyebabkan cedera serius bahkan kematian. Untuk mengendalikan bahaya tersebut, diperlukan pemasangan penyangga yang sesuai dengan standar teknis pertambangan, diikuti oleh inspeksi pemasangan secara menyeluruh, serta pengawasan teknis yang ketat dari personel yang kompeten.

2. **Pemeriksaan Kondisi Geologi Tambang**

Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi geologi di sekitar area kerja stabil dan aman untuk aktivitas tambang. Potensi bahaya terjadi ketika kondisi geologi yang labil tidak terdeteksi, sehingga dapat menyebabkan longsor mendadak. Dampaknya sangat fatal, terutama bagi pekerja yang sedang berada di dalam area kerja aktif. Pengendalian dilakukan melalui survei geoteknik secara rutin, analisis stabilitas tanah menggunakan perangkat khusus, serta pelibatan konsultan geoteknik independen untuk validasi kondisi struktur batuan dan tanah.

3. **Pemasangan Sistem Monitoring Tanah**

Monitoring tanah merupakan sistem pendeteksi awal terhadap pergerakan tanah atau deformasi struktur batuan. Jika sensor tidak terpasang, maka tidak ada peringatan dini ketika terjadi potensi longsor atau pergeseran tanah. Hal ini menyebabkan kegagalan sistem peringatan dan meningkatkan risiko kecelakaan kerja. Oleh karena itu, perusahaan harus melakukan pemasangan sensor tanah di titik-titik rawan, serta menjalankan inspeksi dan kalibrasi rutin untuk memastikan seluruh sistem bekerja secara optimal dan akurat.

4. Pemasangan Alarm Peringatan

Sistem alarm berfungsi sebagai penanda bahaya dan instruksi evakuasi saat terjadi kondisi darurat. Potensi bahaya muncul apabila alarm tidak terpasang atau tidak berfungsi saat dibutuhkan, sehingga tidak ada peringatan dan menyebabkan kegagalan evakuasi. Untuk itu, langkah pengendalian mencakup pemasangan alarm darurat di lokasi strategis, pengujian fungsi alarm secara berkala, serta penyusunan dan sosialisasi standar operasional prosedur (SOP) penggunaan alarm dalam keadaan darurat.

5. Inspeksi dan Pengawasan K3

Inspeksi rutin terhadap area kerja menjadi bagian penting dari sistem pengawasan keselamatan. Potensi bahaya timbul ketika inspeksi K3 tidak dilakukan secara berkala, sehingga bahaya tidak terdeteksi sejak awal. Risiko ini dapat dikurangi dengan menetapkan jadwal inspeksi K3 secara berkala, mendokumentasikan seluruh temuan dan tindakan korektif, serta melakukan audit internal maupun eksternal guna memastikan pelaksanaan keselamatan kerja dijalankan sesuai prosedur.

6. Penerapan SOP K3

SOP atau prosedur kerja standar berfungsi sebagai panduan keselamatan operasional. Namun, dalam praktiknya sering kali ditemukan pelanggaran SOP atau kurangnya pengawasan terhadap pelaksanaannya. Hal ini menyebabkan prosedur keselamatan tidak efektif, sehingga membuka celah besar terhadap kecelakaan kerja. Untuk itu, perlu dilakukan sosialisasi intensif mengenai SOP kepada seluruh pekerja, pengawasan pelaksanaan SOP secara ketat, serta penerapan sanksi tegas terhadap pelanggaran SOP sebagai bentuk penegakan budaya keselamatan kerja.

3.3. Analisis Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode analisis risiko yang digunakan untuk menelusuri akar penyebab kecelakaan kerja secara sistematis dan hierarkis. Berbeda dengan Job Safety Analysis (JSA) yang berfokus pada identifikasi bahaya berdasarkan urutan aktivitas kerja, FTA menyusun hubungan sebab-akibat antara peristiwa utama (*top event*) dan peristiwa-peristiwa dasar (*basic events*) melalui struktur logika yang dikenal sebagai *gate* (AND/OR). Pendekatan ini memungkinkan pemodelan visual dan logis tentang bagaimana suatu kecelakaan dapat terjadi akibat kombinasi dari beberapa kegagalan sistem, baik yang bersifat teknis maupun manajerial.

Dalam penelitian ini, FTA diterapkan untuk menganalisis insiden kecelakaan kerja berupa pekerja tertimbun akibat longsor tanah, yang ditetapkan sebagai *top event*. Struktur penyebab dari kejadian ini telah divisualisasikan dalam bentuk diagram pada Gambar 2.1, yang menunjukkan tiga kelompok utama penyebab kecelakaan, yaitu: (1) runtuhnya struktur tanah, (2) gagalnya sistem peringatan dini, dan (3) lemahnya pengawasan K3.

1. Top Event: Pekerja Tertimbun Akibat Longsor Tanah

Level	Event / Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya / Dampak	Pengendalian Bahaya
Top Event	Pekerja tertimbun akibat longsor tanah	OR Gate	Struktur runtuh; Tidak ada sistem peringatan; Kurangnya pengawasan K3	Pekerja tertimbun, cedera / kematian	Gabungan seluruh kontrol di bawah

Pada struktur Fault Tree Analysis (FTA) yang telah disusun, peristiwa utama (*top event*) yang dianalisis adalah pekerja tertimbun akibat longsor tanah. Top event ini merupakan kejadian akhir yang tidak diharapkan dan memiliki dampak serius berupa cedera berat hingga kematian.

Berdasarkan diagram dan tabel FTA (lihat Tabel 2.2), top event ini ditelusuri melalui tiga jalur penyebab langsung, yaitu: (1) struktur tanah yang runtuh, (2) tidak berfungsinya sistem peringatan dini, dan (3) lemahnya pengawasan terhadap penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Hubungan antara ketiga faktor tersebut menggunakan logika OR Gate, yang berarti bahwa salah satu saja dari ketiga penyebab sudah cukup untuk memicu terjadinya kecelakaan.

Dengan demikian, pencegahan terhadap top event ini tidak cukup dilakukan secara parsial, melainkan harus dilakukan secara menyeluruh dengan mengendalikan seluruh jalur penyebab yang ada di bawahnya. Upaya

pengendalian melibatkan gabungan dari berbagai tindakan, seperti peningkatan desain struktur tambang, pemasangan sistem peringatan dini, serta penegakan pengawasan terhadap prosedur keselamatan kerja.

2. Struktur Tambang Runtuh (AND Gate)

Level	Event Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya Dampak	Pengendalian Bahaya
Struktur runtuh	Struktur tambang gagal	AND Gate	Penyangga tidak terpasang; Kondisi geologi labil	Struktur runtuh, pekerja tertimpa	Pemasangan penyangga sesuai standar; inspeksi pemasangan; supervisi teknis ketat

Struktur tambang yang runtuh merupakan salah satu penyebab langsung dari kecelakaan tertimbunnya pekerja. Dalam struktur FTA, kejadian ini dikategorikan sebagai *middle event* yang terhubung dengan dua basic events, yaitu: penyangga tidak terpasang dan kondisi geologi labil. Hubungan antara kedua penyebab ini menggunakan AND Gate, yang berarti struktur hanya akan runtuh apabila kedua kondisi tersebut terjadi secara bersamaan.

Penyangga tambang yang tidak terpasang sesuai standar menurunkan kestabilan struktur di area kerja bawah tanah. Hal ini semakin diperparah apabila kondisi geologi di sekitarnya labil, seperti tanah yang retak, lembab, atau mengalami tekanan berlebih. Kombinasi dua faktor ini dapat mengakibatkan keruntuhan tiba-tiba yang sangat membahayakan keselamatan pekerja.

Untuk mencegah terjadinya runtuhnya, diperlukan pengendalian terpadu melalui pemasangan penyangga sesuai standar teknik pertambangan, inspeksi pemasangan secara berkala, serta analisis geoteknik terhadap kondisi tanah dan batuan. Selain itu, pengawasan lapangan oleh petugas teknis berkompeten harus diperkuat agar setiap indikasi kegagalan struktur dapat diidentifikasi sejak dini.

3. Sistem Peringatan Tidak Berfungsi

Level	Event Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya / Dampak	Pengendalian Bahaya
Tidak ada sistem peringatan	Sistem gagal memberi peringatan	OR Gate	Tidak ada sensor tanah; Alarm tidak terpasang	Tidak ada peringatan, gagal evakuasi	Pasang sensor tanah, kalibrasi rutin; pasang alarm, uji fungsi alarm

Sistem peringatan dini berperan penting dalam mendeteksi dan memberi sinyal bahaya kepada pekerja saat terjadi potensi kondisi darurat, seperti pergerakan tanah atau keruntuhan struktur. Dalam struktur FTA, sistem peringatan tidak berfungsi merupakan *middle event* yang berkontribusi langsung terhadap top event, yaitu pekerja tertimbun akibat longsor.

Kegagalan sistem ini disebabkan oleh dua faktor dasar, yaitu: (1) tidak adanya sensor tanah yang mampu mendeteksi pergerakan geoteknik, dan (2) alarm peringatan tidak terpasang atau rusak. Kedua faktor ini terhubung dengan OR Gate, artinya salah satu saja dari kedua kondisi tersebut sudah cukup untuk menyebabkan sistem peringatan gagal berfungsi.

Ketiadaan sensor tanah membuat pergerakan lapisan bawah tanah tidak terpantau, sehingga gejala awal seperti retakan atau deformasi tanah tidak terdeteksi. Di sisi lain, alarm yang tidak terpasang atau tidak diuji secara rutin akan menyebabkan pekerja tidak mendapatkan instruksi evakuasi saat situasi darurat terjadi. Hal ini memperbesar risiko keterlambatan evakuasi, bahkan gagal evakuasi total.

Pengendalian terhadap middle event ini dapat dilakukan melalui pemasangan sensor pergerakan tanah di titik-titik rawan, disertai inspeksi dan kalibrasi secara berkala untuk menjamin keandalan sensor. Selain itu, alarm peringatan harus dipasang di lokasi strategis, diuji fungsinya secara rutin, dan didukung dengan SOP tanggap darurat yang disosialisasikan secara berkala kepada seluruh pekerja.

4. Kurangnya Pengawasan K3

Level	Event Faktor	Jenis Gate / Tipe	Penyebab Langsung	Potensi Bahaya / Dampak	Pengendalian Bahaya
Kurangnya pengawasan K3	Sistem pengawasan lemah	OR Gate	Inspeksi K3 tidak rutin; SOP tidak diawasi	Bahaya terdeteksi, prosedur tidak efektif	Jadwal inspeksi berkala; audit K3; sosialisasi SOP; pengawasan ketat

Pengawasan terhadap penerapan sistem Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan faktor penting dalam mencegah kecelakaan di lingkungan tambang. Dalam struktur FTA, kurangnya pengawasan K3 menjadi salah satu *middle event* yang secara langsung berkontribusi terhadap terjadinya kecelakaan kerja.

Kondisi ini dapat disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu: (1) inspeksi K3 tidak dilakukan secara rutin, dan (2) SOP tidak diawasi atau dilanggar di lapangan. Kedua faktor tersebut dikaitkan menggunakan OR Gate, yang berarti cukup satu saja dari kondisi tersebut terjadi, maka pengawasan K3 sudah dinilai gagal.

Inspeksi yang tidak konsisten menyebabkan potensi bahaya tidak teridentifikasi sejak dini. Selain itu, SOP yang tidak diawasi atau dilanggar secara terus-menerus menunjukkan lemahnya budaya keselamatan dan minimnya kontrol manajemen terhadap pelaksanaan prosedur kerja aman. Kombinasi kedua hal ini memperbesar peluang terjadinya insiden, karena sistem pencegahan tidak berjalan sebagaimana mestinya.

Pengendalian terhadap middle event ini mencakup penyusunan jadwal inspeksi K3 yang teratur, dokumentasi hasil inspeksi, serta pelaksanaan audit internal dan eksternal secara berkala. Di samping itu, perusahaan perlu melakukan sosialisasi SOP secara menyeluruh kepada seluruh pekerja, serta menerapkan pengawasan langsung di lapangan dan sanksi tegas bagi pelanggaran SOP, guna menegakkan budaya keselamatan kerja yang disiplin dan berkelanjutan.

3.4. Perbandingan Job Safety Analysis (JSA) dan Fault Tree Analysis (FTA)

Setelah dilakukan analisis terhadap kecelakaan kerja menggunakan metode Job Safety Analysis (JSA) dan Fault Tree Analysis (FTA), dapat terlihat bahwa kedua pendekatan ini memiliki karakteristik, fokus, dan kedalaman analisis yang saling melengkapi. JSA berfungsi sebagai alat identifikasi awal terhadap potensi bahaya berdasarkan urutan pekerjaan, sementara FTA memungkinkan penelusuran lebih mendalam terhadap struktur penyebab kecelakaan yang lebih kompleks secara sistematis dan logis.

Pada analisis JSA, potensi bahaya diidentifikasi berdasarkan enam langkah kerja utama, mulai dari pemasangan penyangga hingga penerapan SOP K3. Masing-masing langkah dianalisis dari segi potensi bahaya, dampak yang mungkin timbul, dan langkah pengendalian yang dapat diterapkan. Analisis ini membantu mengidentifikasi titik-titik rawan bahaya secara operasional dan memberikan solusi pengendalian bersifat langsung dan preventif.

Sementara itu, FTA digunakan untuk menelusuri akar penyebab dari peristiwa utama (*top event*) berupa pekerja tertimbun akibat longsor tambang. Melalui logika AND dan OR Gate, FTA membentuk struktur penyebab yang menunjukkan bahwa insiden kecelakaan dapat dipicu oleh kombinasi beberapa faktor: runtuhnya struktur tambang, sistem peringatan yang tidak berfungsi, dan lemahnya pengawasan K3. FTA tidak hanya menunjukkan hubungan antar faktor, tetapi juga membantu menyusun prioritas dalam pengendalian risiko berdasarkan keterkaitan logis antara satu penyebab dengan lainnya.

Perbandingan antara hasil JSA dan FTA menunjukkan bahwa sebagian besar potensi bahaya yang diidentifikasi dalam JSA muncul kembali sebagai *basic events* atau *middle events* dalam struktur FTA. Hal ini menunjukkan konsistensi antara dua pendekatan, sekaligus memperkuat validitas temuan. Selain itu, JSA lebih bersifat deskriptif

dan operasional, sedangkan FTA memberikan perspektif analitis dan strategis dalam pengambilan keputusan manajerial terkait pengendalian risiko.

4. Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis penyebab kecelakaan kerja yang terjadi di tambang batu bara Sawahlunto dengan pendekatan metode *Job Safety Analysis (JSA)* dan *Fault Tree Analysis (FTA)*. Berdasarkan hasil analisis, metode JSA berhasil mengidentifikasi enam tahapan kerja utama yang memiliki potensi bahaya, di antaranya pemasangan penyangga tambang, pemeriksaan kondisi geologi, serta penerapan prosedur Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Setiap tahapan menunjukkan risiko yang berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja apabila tidak disertai dengan pengendalian yang tepat. Melalui analisis FTA, diketahui bahwa peristiwa utama berupa tertimbunnya pekerja akibat longsor disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor, seperti kegagalan struktur tambang, tidak berfungsinya sistem peringatan dini, dan lemahnya pengawasan terhadap pelaksanaan prosedur K3. Analisis FTA juga menunjukkan bahwa kecelakaan tersebut merupakan hasil dari interaksi antara penyebab teknis dan manajerial yang tidak ditangani secara sistematis. Dari hasil integrasi kedua metode tersebut, dapat disimpulkan bahwa kecelakaan kerja di tambang bukan merupakan akibat dari satu faktor tunggal, melainkan kegagalan sistem yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan upaya pencegahan yang bersifat menyeluruh, mulai dari aspek teknis hingga penguatan manajemen keselamatan kerja. Langkah-langkah yang direkomendasikan antara lain meliputi pemasangan sistem pemantauan geoteknik, penyusunan dan pelaksanaan SOP evakuasi, pelatihan K3 secara berkala, serta peningkatan pengawasan terhadap implementasi K3 di lapangan. Selain itu, perlu juga dipertimbangkan adanya hasil penelitian yang membuktikan bahwa penggunaan aplikasi SIKAP mendukung penguatan budaya keselamatan kerja di tambang dengan meningkatkan kepatuhan pekerja dalam pelaporan potensi bahaya dan kecelakaan kerja. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi perusahaan tambang dalam meningkatkan efektivitas sistem keselamatan kerja serta menjadi referensi dalam perumusan kebijakan K3 yang lebih baik dan berkelanjutan, khususnya dalam mendukung terwujudnya target zero accident di sektor pertambangan. Selain hal di atas, yang perlu juga diketahui dan mendapatkan perhatian adalah kecelakaan kerja di tambang bukan merupakan akibat dari satu faktor tunggal, melainkan kegagalan sistem yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan upaya pencegahan yang bersifat menyeluruh, mulai dari aspek teknis hingga penguatan manajemen keselamatan kerja. Salah satu diantara yang sangat penting untuk dianalisis secara sistematis adalah adanya potensi kecelakaan sistem transportasi tambang batu bara, sehingga perlu membangun sistem prapengendalian risiko dalam rangka transformasi cerdas dan efisiensi penambangan tambang batu bara.

Referensi

- [1] I. B. Efendi, E. B. Sulistiarini, A. D. Affandi, and M. A. Syarif, "Jurnal Produktiva Analisis Kecelakaan Kerja Bidang Transportasi (Studi Kasus : Kereta Coromandal Express dan Howrah Express Di India)," vol. 01, 2024.
- [2] M. F. H. M. F. Hamzah, "Analisis Beban Kerja Dengan Metode Cardiovascular Load (CvL) & Nasa-Tlx (Studi Kasus Pt. Energi Agro Nusantara)," p. 2019, 2019, [Online]. Available: <http://repository.unim.ac.id/id/eprint/175>
- [3] T. Suparyanto, T. A. Santosa, R. U. A. Fauzi, A. R. Nungraha, D. Dewanto, and R. Tarmizi, "Diversity and Inclusion in the Workplace: Assessing Their Effects on Employee Performance and Innovation," *RIGGS J. Artif. Intell. Digit. Bus.*, vol. 4, no. 1, pp. 38–42, 2025, doi: 10.31004/riggs.v4i1.370.
- [4] T. Güyagüler, A. Karakaş, and A. Güngör, "Occupational Health and Safety in Mining Industry," no. October 2009, p. 160, 2005.
- [5] I. M. Jaelani, M. Muslimin, and I. B. Efendi, "ANALISIS RISIKO WORK-RELATED MUSCULOSKELETAL DISORDERS BERDASARKAN POSTUR KERJA PADA PEKERJA INDUSTRI SANDAL HANDMADE (Studi Kasus di UD. Yuriko Indonesia)," *Semin. Nas. Fak. Tek.*, vol. 1, no. 1, pp. 249–258, 2022, doi: 10.36815/semastek.v1i1.43.
- [6] 刘志飞, "Analysis of Human Factors of Coal Mine Accidents Based on HFACS-Grey Relational Analysis," *Adv. Appl. Math.*, vol. 11, no. 12, pp. 8884–8891, 2022, doi: 10.12677/aam.2022.1112936.
- [7] S. Maulana, E. E. Rosyida, and I. B. Efendi, "Productivity Improvement Perusahaan Furniture Melalui Reduksi Elemen Kerja," vol. 0722067704, pp. 8–9, 2020.
- [8] D. E. Cahyono and I. B. Efendi, "Analisis Postur Kerja Pada Manual Material Handling Menggunakan Metode Owas Dan Reba Di Bagian Sortir Packing," vol. 0722067704, pp. 24–25, 2020, [Online]. Available: <http://repository.unim.ac.id/2738/>
- [9] I. Print, D. A. N. Spp, R. P. Utomo, M. Muslimin, and I. B. Efendi, "Jurnal Produktiva ANALISIS POSTUR KERJA MANUAL MENGGUNAKAN METODE REBA," vol. 01, pp. 1–6, 2024.
- [10] J. Atmaja, E. Suardi, M. Natalia, Z. Mirani, and M. P. Alpina, "Penerapan Sistem Pengendalian Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Pelaksanaan Proyek Konstruksi di Kota Padang," *J. Ilm. Rekayasa Sipil*, vol. 15, no. 2, pp. 64–76, 2018, doi: 10.30630/jirs.15.2.125.

-
- [11] "Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS) Kontribusi Motivasi Kerja dan Lingkungan Kerja Terhadap Kinerja Guru," vol. 3, no. 4, pp. 10–17, 2025.
- [12] N. R. Swari and I. Cahyani, "Pengaturan Pengelolaan Sumber Daya Alam Dan Lingkungan Hidup Di Kawasan Pertambangan Mineral Dan Batu Bara," *Inicio Legis*, vol. 3, no. 1, pp. 38–51, 2022, doi: 10.21107/il.v3i1.14899.
- [13] C. Yulistio, "Analisis Penerapan Metode Fault Tree Analysis (Fta), Metode Job Safety Analysis (Jsa), Dan Metode 6S (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke, Safety) Terhadap Para Pekerja Di Area Workshop Fabrikasi (Studi Kasus: Pt. Xyz) Tugas," *Int. J. Technol.*, vol. 47, no. 1, p. 100950, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.01.002><https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100950><https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.04.007><https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102816><https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.015><https://doi.org/10.1016/j>
- [14] H. S. B. Duzgun and H. H. Einstein, "Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines," *Saf. Sci.*, vol. 42, no. 1, pp. 23–41, 2004, doi: 10.1016/S0925-7535(02)00067-X.
- [15] P. Akbar *et al.*, "Proses Pencetakan Pt Mega Jaya Logam," vol. 3, no. 2, pp. 360–374, 2023.
- [16] G. V. R. Goodman, "An assessment of coal mine escapeway reliability using fault tree analysis," *Min. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 205–215, 1988, doi: 10.1016/S0167-9031(88)90610-X.
- [17] D. Yuliati, "Combined Risk Based Inspection and Fault Tree Analysis for Repetitive 3-Phase Line Piping Leakage at West Java Offshore Topside Facility," *J. Mater. Explor. Find.*, vol. 2, no. 3, 2023, doi: 10.7454/jmef.v2i3.1034.
- [18] C. Liu, J. Li, and D. Zhang, "Mine Ground Gas Transportation System," 2024.
- [19] B. Abbas and A. Matin, "Risk Assessment Using Job Safety Analysis (JSA)," *Conf. 18th Iran. Int. Ind. Eng. Iran Inst. Ind. Eng.*, no. December, 2021.
- [20] E. Chisakulo, "Application of job safety analysis in copper mining operations: a review," no. March, 2025, doi: 10.52417/ajhse.v6i1.556.
- [21] J. Yang, J. Zhao, and L. Shao, "Risk Assessment of Coal Mine Gas Explosion Based on Fault Tree Analysis and Fuzzy Polymorphic Bayesian Network: A Case Study of Wangzhuang Coal Mine," *Processes*, vol. 11, no. 9, 2023, doi: 10.3390/pr11092619.
- [22] S. Shi, B. Jiang, and X. Meng, "Assessment of gas and dust explosion in coal mines by means of fuzzy fault tree analysis," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 6, pp. 991–998, 2018, doi: 10.1016/j.ijmst.2018.07.007.
- [23] S. Ultan, M. S. Etyadi, D. R. Amdan, and I. M. H. Aviluddin, "OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH OF COAL MINING SECTOR USING SIKAP IN EAST KALIMANTAN , INDONESIA," vol. 4, no. 1, pp. 87–92, 2025.
- [24] L. He *et al.*, "A Case Study of Accident Analysis and Prevention for Coal Mining Transportation System Based on FTA-BN-PHA in the Context of Smart Mining Process," *Mathematics*, vol. 12, no. 7, 2024, doi: 10.3390/math12071109.