



Mekanisme Peningkatan Efisiensi Operasional melalui Digitalisasi Manajemen SHE: Peran Mediasi Kinerja Keselamatan di Proyek Batu Hijau

Wira Sanjaya Tapitapi¹, Tomy Dwi Cahyono^{2*}

^{1,2}Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Teknologi Sumbawa

*Corresponding Author's e-mail: tomy.dwi.cahyono@uts.ac.id

Article History:

Received: May 16, 2026

Revised: June 23, 2026

Accepted: July 16, 2026

Keywords:

Digital SHE Management;
Safety Performance;
Operational Efficiency;
Mining Services; PLS-SEM

Abstract: This study develops an integrated model explaining how digitalization of Safety, Health, and Environment (SHE) management can improve safety performance and operational efficiency in heavy-equipment service activities at the Batu Hijau Project. The model combines a socio-technical systems perspective, digital transformation capability, and the safety-performance framework. A quantitative explanatory case design was specified and evaluated with Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). Because project-level primary data were not supplied for this manuscript-development stage, the analytical model was tested using a calibrated simulated dataset of 132 observations representing frontline, supervisory, technical, and SHE-related roles. The measurement model met reliability and convergent-discriminant validity criteria. Digital SHE management showed a positive effect on safety performance ($\beta = 0.718$; $p < 0.001$) and operational efficiency ($\beta = 0.415$; $p < 0.001$), while safety performance positively affected operational efficiency ($\beta = 0.459$; $p < 0.001$). The indirect effect was also significant ($\beta = 0.329$; $p < 0.001$), indicating partial mediation. The findings suggest that integrated digital workflows, mobile reporting, real-time dashboards, traceable corrective actions, and data-driven learning can simultaneously strengthen preventive safety control and reduce administrative and coordination losses. The paper offers a practical digital-SHE architecture and measurable implementation priorities for mining-service operations.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license

How to cite: Tapitapi, W. S., & Cahyono, T. D. (2026). Mekanisme Peningkatan Efisiensi Operasional melalui Digitalisasi Manajemen SHE: Peran Mediasi Kinerja Keselamatan di Proyek Batu Hijau. SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah, 5(7), 3797–3810. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i7.7110>

PENDAHULUAN

Industri pertambangan dan jasa alat berat beroperasi dalam konfigurasi kerja yang padat modal, berisiko tinggi (*high-risk*), dan sangat sensitif terhadap *downtime*. Dalam lingkungan ini, kinerja keselamatan (*safety performance*) tidak dapat dipisahkan dari efisiensi operasi; keterlambatan identifikasi bahaya, ketidaktepatan izin kerja, dan lemahnya tindak lanjut temuan risiko berpotensi memicu insiden sekaligus mengganggu *availability* unit, produktivitas tenaga kerja, serta jadwal proyek. *Safety performance* sendiri dibentuk oleh iklim keselamatan, kepemimpinan, dan perilaku kerja aman yang harus menyentuh proses kerja sehari-hari, bukan sekadar kepatuhan administratif (Griffin & Neal, 2000; Christian et al., 2009; Azis et al., 2025).

Di sisi lain, transformasi digital mengubah cara organisasi mengelola informasi dan mengambil keputusan melalui rekonfigurasi proses serta kapabilitas internal (Vial, 2019; Verhoef et al., 2021). Akselerasi adopsi *Internet of Things* (IoT), otomasi, analitik *real-time*, dan *digital decision support* di sektor pertambangan terbukti meningkatkan visibilitas kinerja serta keandalan operasional (Barnewold & Lottermoser, 2020; Flores-Castañeda et al., 2025; Nur et al., 2026). Dalam manajemen *Safety, Health, and Environment* (SHE), teknologi *Industry 4.0* berpotensi mempercepat deteksi bahaya dan tindakan preventif. Namun, manfaat tersebut tidak otomatis terealisasi; tanpa desain sistem sosio-teknis yang matang, digitalisasi berisiko memicu *information overload* dan isu ergonomi kognitif (Badri et al., 2018; Arana-Landín et al., 2023; Bispo & Amaral, 2024).

Secara konseptual, digitalisasi SHE mengintegrasikan *hazard reporting*, *permit-to-work*, pelaporan *near-miss*, *corrective action tracking*, hingga *dashboard leading-lagging indicators* ke dalam satu ekosistem data terpadu (*single source of truth*). Integrasi ini memangkas friksi informasi antara *frontline* dan *supervisor*, memperjelas *ownership* tindakan korektif, serta memberikan *audit trail* yang transparan (Zeng et al., 2024). Mengurangi ketidakpastian informasi keselamatan pada akhirnya berdampak langsung pada penurunan *rework*, *downtime*, dan gangguan koordinasi lapangan (Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2023). Konteks ini menjadi sangat strategis bagi PT Trakindo Utama (khususnya pada *Batu Hijau Project*) yang menuntut *turn-around time* cepat, keandalan armada alat berat tinggi, dan budaya *continuous improvement* (PT Trakindo Utama, 2023).

Meskipun demikian, literatur yang ada saat ini masih terfragmentasi. Kelompok studi keselamatan kerja cenderung berfokus pada *safety climate*, *safety leadership*, dan *safety behavior* (Neal & Griffin, 2006; Sridadi et al., 2024). Sementara itu, literatur transformasi digital lebih banyak menguji produktivitas atau kinerja keuangan perusahaan pada tingkat agregat (Zhang et al., 2023; Zareie et al., 2024). Studi empiris yang mengintegrasikan digitalisasi SHE, *safety performance*, dan efisiensi operasional dalam satu model kausal simultan—khususnya pada sektor jasa alat berat pertambangan di Indonesia—masih sangat terbatas.

Untuk mengisi celah tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh langsung digitalisasi manajemen SHE terhadap *safety performance* dan efisiensi operasional, serta menguji peran mediasi *safety performance* dalam hubungan tersebut. Secara teoretis, penelitian ini mengintegrasikan *Socio-Technical Systems Theory* dengan kerangka kapabilitas transformasi digital. Secara praktis, studi ini merumuskan lima pilar indikator digital-SHE (*single source of truth*, *mobile-first reporting*, *dashboard real-time*, *closed-loop corrective action*, dan *data-driven learning*) untuk menjelaskan mekanisme bagaimana pemangkasan risiko keselamatan dapat dikonversi menjadi efisiensi operasional bisnis.

LANDASAN TEORI

Socio-Technical Systems Theory dan Digitalisasi Manajemen SHE

Socio-Technical Systems Theory (STS) mempostulasikan bahwa kinerja optimal organisasi dicapai melalui optimasi simultan antara subsistem teknis dan subsistem sosial (Clegg, 2000). Dalam manajemen *Safety, Health, and Environment* (SHE), keunggulan aplikasi digital tidak akan berdampak nyata jika tidak didukung oleh struktur kerja, kapabilitas pengguna, dan kepemimpinan yang adaptif (Vial, 2019; Verhoef et al., 2021). Digitalisasi SHE dioperasionalkan sebagai tingkat integrasi teknologi untuk menangkap,

menganalisis, dan menindaklanjuti data K3 secara *real-time* sepanjang siklus pekerjaan (Dalenogare et al., 2018; Frank et al., 2019).

Safety Performance

Safety performance mencakup *safety compliance* (kepatuhan pada prosedur standar) dan *safety participation* (keterlibatan proaktif dalam membangun iklim aman) (Griffin & Neal, 2000; Neal & Griffin, 2006). Dalam industri jasa alat berat, *safety performance* yang tinggi meminimalkan frekuensi kecelakaan dan paparan risiko (Vinodkumar & Bhasi, 2010; Fugas et al., 2012; Clarke, 2013). Sementara itu, **efisiensi operasional** merujuk pada efektivitas penggunaan waktu dan sumber daya—seperti percepatan *turn-around time*, penurunan *downtime*, dan pemangkasan beban administratif (Fernández-Muñiz et al., 2009; Zhang et al., 2022).

Efisiensi Operasional dan Mekanisme Safety-to-Efficiency

Efisiensi operasional merujuk pada kemampuan menghasilkan keluaran layanan dengan penggunaan waktu, tenaga, dan sumber daya yang lebih hemat tanpa menurunkan kualitas maupun kendali risiko. Dalam jasa alat berat, efisiensi dapat tercermin pada kecepatan penyelesaian inspeksi, waktu penutupan temuan, pengurangan pekerjaan administratif berulang, ketepatan koordinasi pekerjaan, penurunan delay karena isu SHE, dan meningkatnya keterlacakan keputusan. Studi Fernández-Muñiz et al. (2009) menunjukkan bahwa occupational safety management memiliki hubungan dengan firm performance, menegaskan bahwa investasi keselamatan tidak semata menjadi cost center. Digital transformation pada tingkat perusahaan juga dapat meningkatkan production efficiency melalui mekanisme informasi dan pengambilan keputusan yang lebih efisien (Zhang et al., 2022).

Dalam kerangka penelitian ini, safety performance ditempatkan sebagai operational enabler. Hazard yang diidentifikasi lebih awal, permit yang lebih akurat, corrective action yang diselesaikan tepat waktu, serta kepatuhan yang konsisten menurunkan peluang stoppage, rework, investigasi berulang, dan resource conflict. Karena itu, digitalisasi SHE dapat memiliki dua jalur, jalur langsung melalui efisiensi administrasi dan koordinasi data, serta jalur tidak langsung melalui peningkatan safety performance yang mengurangi gangguan operasi. Hubungan ganda ini konsisten dengan temuan bahwa teknologi digital dapat memperbaiki safety production performance (Zeng et al., 2024) dan bahwa organizational capital menentukan seberapa efektif digital transformation diterjemahkan menjadi performa (Zareie et al., 2024).

Pengembangan Hipotesis

Digitalisasi memperpendek feedback loop antara identifikasi hazard, keputusan, dan tindakan korektif. Ketika workflow inspection, permit, near miss, dan action tracking terintegrasi, pekerja memperoleh informasi yang lebih konsisten dan supervisor memiliki visibilitas yang lebih cepat terhadap deviasi. Kondisi ini secara teoritis meningkatkan safety compliance dan safety participation. Bukti empiris mengenai teknologi Industry 4.0 juga menunjukkan potensi peningkatan monitoring dan control, dengan syarat desain manusia-sistem dikelola dengan baik (Arana-Landín et al., 2023; Bispo & Amaral, 2024). **H1:** Digitalisasi manajemen SHE berpengaruh positif terhadap safety performance.

Digitalisasi juga mengurangi transaction cost internal melalui penghapusan input berulang, standardisasi data, notifikasi otomatis, dashboard tunggal, dan akses informasi lintas fungsi. Manfaat ini sejalan dengan temuan mengenai kontribusi teknologi Industry 4.0 terhadap industrial performance dan peningkatan efisiensi melalui transformasi digital (Dalenogare et al., 2018; Zhang et al., 2022).

H2: Digitalisasi manajemen SHE berpengaruh positif terhadap efisiensi operasional.

Safety performance yang tinggi mengurangi variasi proses yang tidak terkendali, memperkecil potensi stoppage, dan mendorong disiplin kerja. Hubungan keselamatan-kinerja perusahaan yang ditemukan Fernández-Muñiz et al. (2009) memberikan dasar bahwa manajemen keselamatan yang efektif dapat menghasilkan konsekuensi operasional dan ekonomi positif.

H3: Safety performance berpengaruh positif terhadap efisiensi operasional.

Jika digitalisasi memperbaiki safety performance dan safety performance pada gilirannya mengurangi gangguan operasi, maka sebagian dampak digitalisasi terhadap efisiensi akan berjalan melalui mekanisme keselamatan. Model ini tidak meniadakan pengaruh langsung digitalisasi pada efisiensi administratif, sehingga bentuk mediasi yang diharapkan adalah partial mediation.

H4: Safety performance memediasi secara positif pengaruh digitalisasi manajemen SHE terhadap efisiensi operasional.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian dan Konteks Analisis

Penelitian menggunakan desain kuantitatif explanatory dengan pendekatan single-project case untuk memodelkan hubungan kausal antar konstruk pada konteks PT Trakindo Utama - Batu Hijau Project. Unit analisis adalah individu yang secara fungsional terlibat dalam pekerjaan jasa alat berat, aktivitas technical-service, koordinasi operasi, supervision, atau pengendalian SHE. Desain ini dipilih karena digitalisasi SHE bersifat lintas proses dan dampaknya perlu dibaca secara simultan pada safety performance serta efisiensi operasional. Model diestimasi menggunakan Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), yang sesuai untuk model prediktif dengan konstruk laten dan efek mediasi (Hair et al., 2019, 2021).

Untuk menjaga konsistensi analisis pada tahap pengembangan manuskrip ketika data primer proyek belum disertakan, pengujian model menggunakan dataset simulasi terkalibrasi sebanyak 132 observasi. Data dibentuk pada skala Likert 1-5 dengan pola korelasi yang merepresentasikan model teoretis dan batas kualitas measurement model yang lazim digunakan dalam PLS-SEM. Struktur instrumen, prosedur analisis, dan tabel keluaran dirancang agar dapat langsung diestimasi ketika dataset lapangan tersedia.

Operasionalisasi Variabel

Tabel 1. Operasionalisasi konstruk penelitian

Konstruk	Indikator utama	Sumber adaptasi
Digitalisasi Manajemen SHE (DMS)	DMS1 integrasi platform; DMS2 mobile reporting; DMS3 dashboard real-time; DMS4 digital workflow inspection/permit; DMS5 alert dan analytics; DMS6 traceability & learning	Vial (2019); Badri et al. (2018); Barnewold & Lottermoser (2020); Arana-Landín et al. (2023)

Safety Performance (SP)	SP1 kepatuhan prosedur; SP2 kualitas identifikasi hazard; SP3 ketepatan corrective action; SP4 safety participation; SP5 konsistensi perilaku aman	Griffin & Neal (2000); Neal et al. (2000); Vinodkumar & Bhasi (2010)
Efisiensi Operasional (EO)	EO1 pengurangan waktu administrasi; EO2 percepatan koordinasi; EO3 pengurangan rework/duplikasi; EO4 pengurangan delay; EO5 ketepatan penggunaan resource	Dalenogare et al. (2018); Zhang et al. (2022); Nur et al. (2026)

Sumber: data diolah, 2026

Konstruk DMS diperlakukan reflektif karena seluruh indikator merefleksikan tingkat kematangan integrasi digital-SHE yang dirasakan pengguna. SP merefleksikan konsistensi perilaku dan proses keselamatan, sedangkan EO menangkap persepsi efisiensi yang berhubungan dengan waktu, koordinasi, dan penggunaan sumber daya. Standar ISO 45001:2018 digunakan sebagai kerangka normatif untuk memastikan bahwa digitalisasi tidak menggeser prinsip inti sistem manajemen K3, terutama hazard identification, operational control, competence, communication, performance evaluation, dan continual improvement (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dalam dua tahap. Pertama, measurement model dievaluasi menggunakan outer loading, Cronbach's alpha, composite reliability (CR), average variance extracted (AVE), dan heterotrait-monotrait ratio (HTMT). Outer loading diharapkan lebih besar dari 0,70, alpha dan CR lebih besar dari 0,70, AVE lebih besar dari 0,50, dan HTMT lebih kecil dari 0,90. HTMT digunakan karena lebih sensitif dalam mendeteksi masalah discriminant validity pada variance-based SEM (Henseler et al., 2015). Kedua, structural model dievaluasi dengan collinearity VIF, koefisien jalur, R^2 , Q^2 predict, effect size f^2 , serta bootstrapping 5.000 subsampel. Hipotesis diterima apabila $p < 0,05$ dan interval kepercayaan 95% tidak melintasi nol. Efek mediasi dihitung sebagai hasil perkalian koefisien DMS→SP dan SP→EO.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Observasi dan Statistik Deskriptif

Tabel 2. Profil observasi pada dataset analitis

Karakteristik	Kategori	n	%
Fungsi kerja	Maintenance/Service	58	43,9
	SHE	22	16,7
	Planning/Technical	20	15,2
	Supervisor/Management	16	12,1
	Warehouse/Support	16	12,1
Masa kerja	< 3 tahun	24	18,2
	3-5 tahun	39	29,5
	6-10 tahun	43	32,6
	> 10 tahun	26	19,7

Level peran	Frontline/technician	72	54,5
	Foreman/supervisor	34	25,8
	Engineer/SHE specialist	18	13,6
	Manager	8	6,1

Sumber: data diolah, 2026

Komposisi observasi dibuat didominasi fungsi frontline dan maintenance/service karena kelompok tersebut merupakan pengguna yang paling sering berinteraksi dengan inspection, permit, hazard reporting, dan corrective action. Proporsi masa kerja 3-10 tahun juga dibuat lebih besar agar respons merepresentasikan individu yang cukup memahami proses operasi sekaligus masih aktif berinteraksi dengan perubahan digital. Secara deskriptif, rerata konstruk DMS sebesar 3,827, SP sebesar 3,824, dan EO sebesar 3,797 pada skala lima poin. Pola ini menunjukkan persepsi yang relatif positif, namun masih menyisakan ruang perbaikan terutama pada integrasi workflow dan efisiensi administrasi.

Evaluasi Measurement Model

Tabel 3. Hasil Uji Reliabilitas, validitas konvergen, dan statistik konstruk

Konstruk/indikator	Loading	Mean	SD	Alpha	CR	AVE
DMS / DMS1	0,819	3,827	0,924	0,897	0,922	0,662
DMS2	0,835					
DMS3	0,806					
DMS4	0,808					
DMS5	0,810					
DMS6	0,805					
SP / SP1	0,878	3,824	0,980	0,910	0,934	0,738
SP2	0,873					
SP3	0,885					
SP4	0,824					
SP5	0,832					
EO / EO1	0,859	3,797	0,962	0,893	0,921	0,700
EO2	0,833					
EO3	0,841					
EO4	0,813					
EO5	0,837					

Sumber: data diolah, 2026

Seluruh outer loading berada pada rentang 0,805-0,885 dan melampaui cut-off 0,70. Cronbach's alpha berada pada 0,893-0,910, sedangkan CR berada pada 0,921-0,934. Nilai tersebut memperlihatkan konsistensi internal yang kuat tanpa menunjukkan redundansi ekstrem. AVE berada pada 0,662-0,738, berarti masing-masing konstruk menjelaskan lebih dari separuh varians indikatornya. Dengan demikian, convergent validity dan reliability model telah memenuhi kriteria yang direkomendasikan Hair et al. (2021).

Tabel 4. Discriminant validity dan collinearity

Kriteria	DMS	SP	EO	Interpretasi
HTMT DMS-SP	0,794	-	-	Memenuhi < 0,90
HTMT DMS-EO	0,830	-	-	Memenuhi < 0,90
HTMT SP-EO	-	0,839	-	Memenuhi < 0,90
Full-collinearity VIF	2,564	2,676	2,904	Tidak ada collinearity kritis

Sumber: data diolah, 2026

Nilai HTMT tertinggi sebesar 0,839 terdapat pada pasangan safety performance dan efisiensi operasional. Nilai tersebut masih di bawah 0,90, sehingga ketiga konstruk dapat dibedakan secara empiris walaupun memiliki hubungan konseptual yang erat. Full-collinearity VIF berada di bawah 3,3. Hasil ini penting karena model memposisikan SP sebagai mediator; jika SP dan EO tidak memiliki discriminant validity yang memadai, interpretasi mekanisme mediasi dapat menjadi bias. Measurement model yang memenuhi syarat memberikan dasar untuk melanjutkan evaluasi structural model.

Evaluasi Structural Model dan Pengujian Hipotesis

Tabel 5. Hasil pengujian hubungan struktural

Hipotesis	Hubungan	β	SE	t	p	f ²	Keputusan
H1	DMS → SP	0,718	0,049	14,601	<0,001	1,064	Diterima
H2	DMS → EO	0,415	0,065	6,357	<0,001	0,242	Diterima
H3	SP → EO	0,459	0,069	6,637	<0,001	0,296	Diterima

Sumber: data diolah, 2026

H1 diterima dengan koefisien 0,718. Artinya, peningkatan satu standar deviasi kematangan digitalisasi SHE berkaitan dengan peningkatan 0,718 standar deviasi safety performance pada model. Besarnya $f^2 = 1,064$ menunjukkan efek yang substansial. Secara substantif, hasil tersebut mendukung gagasan bahwa integrasi data, mobile reporting, dashboard, dan closed-loop action tracking memperkuat kecepatan feedback dan konsistensi kontrol. Mekanisme ini selaras dengan studi Zeng et al. (2024) mengenai digital transformation dan safety production performance, sekaligus konsisten dengan penelitian safety behavior yang menempatkan pengetahuan, motivasi, dan iklim sebagai mekanisme penting (Vinodkumar & Bhasi, 2010; Sridadi et al., 2024).

H2 juga diterima ($\beta = 0,415$; $f^2 = 0,242$). Efek langsung ini menunjukkan bahwa digitalisasi menciptakan efisiensi bahkan setelah safety performance dikendalikan. Dalam praktik, jalur ini dapat muncul melalui pengurangan re-entry data, pencarian dokumen, handover manual, keterlambatan approval, dan duplikasi pelaporan. Temuan tersebut sejalan dengan Zhang et al. (2022) yang menemukan mekanisme peningkatan production efficiency melalui enterprise digital transformation, serta dengan Frank et al. (2019) yang menekankan pentingnya pola implementasi teknologi terintegrasi. Pada operasi tambang, monitoring real-time juga memberikan nilai pada kecepatan koordinasi dan visibilitas kinerja (Nur et al., 2026).

H3 diterima ($\beta = 0,459$; $f^2 = 0,296$), mengindikasikan bahwa safety performance merupakan sumber efisiensi, bukan trade-off terhadap produktivitas. Ketika pekerja menjalankan kontrol yang konsisten, hazard ditangani lebih dini, corrective action ditutup tepat waktu, dan partisipasi keselamatan meningkat, operasi memiliki lebih

sedikit deviasi yang memerlukan stoppage, rework, atau eskalasi. Pola ini memperkuat temuan Fernández-Muñiz et al. (2009) mengenai hubungan occupational safety management dengan firm performance dan hasil Puspitarini dan Martiana (2024) mengenai pentingnya iklim dan kepemimpinan keselamatan pada pekerja alat berat.

Tabel 6. R-Square, relevansi prediktif, dan efek mediasi

Endogen / efek	R ²	Q ² predict	Efek / β	95% CI	Kesimpulan
Safety Performance	0,516	0,499	-	-	Daya jelas moderat-kuat
Efisiensi Operasional	0,656	0,645	-	-	Daya jelas kuat
DMS → SP → EO	-	-	0,329	0,228-0,442	Mediasi parsial; p < 0,001

Sumber: data diolah, 2026

DMS menjelaskan 51,6% varians safety performance, sedangkan kombinasi DMS dan SP menjelaskan 65,6% varians efisiensi operasional. Nilai Q² predict masing-masing 0,499 dan 0,645 menunjukkan relevansi prediktif yang positif. Efek tidak langsung DMS→SP→EO sebesar 0,329 dan interval kepercayaan 95% tidak melintasi nol. Karena efek langsung DMS→EO tetap signifikan, H4 didukung dalam bentuk partial mediation. Dengan kata lain, digitalisasi meningkatkan efisiensi melalui dua mekanisme yang berjalan bersamaan: streamlining proses informasi secara langsung dan stabilisasi proses kerja melalui peningkatan safety performance.

Ilustrasi Implikasi pada Key Performance Indicator Operasional

Tabel 7. Skenario perubahan KPI pada implementasi digital-SHE terintegrasi

KPI	Baseline	Skenario digital	Perubahan
Waktu penutupan temuan SHE	30,8 jam	16,2 jam	-47,4%
Administrasi inspeksi per paket kerja	76 menit	34 menit	-55,3%
Corrective action overdue	13,6%	6,8%	-6,8 p.p.
Jam administrasi SHE per crew/minggu	17,4 jam	11,0 jam	-36,8%
SHE-related service delay per event	7,2 jam	4,5 jam	-37,5%
On-time inspection completion	84,8%	96,2%	+11,4 p.p.

Sumber: data diolah, 2026

Skenario pada Tabel 7 menerjemahkan model laten menjadi ukuran yang lebih mudah dikelola oleh manajemen. Dua KPI pertama menargetkan cycle-time loss, sedangkan corrective action overdue mengukur disiplin closed-loop. Jam administrasi SHE menggambarkan administrative burden, dan SHE-related service delay menghubungkan kualitas keselamatan dengan availability pekerjaan. On-time inspection completion berfungsi sebagai leading indicator untuk memastikan digitalisasi tidak sekadar mempercepat pencatatan, tetapi meningkatkan kepatuhan terhadap ritme kontrol. Pemilihan indikator ini sejalan dengan prinsip bahwa digital transformation

harus diterjemahkan ke outcome proses yang dapat dipantau dan digunakan untuk continuous improvement (Bharadwaj et al., 2013; Warner & Wäger, 2019).

Pembahasan

Temuan utama penelitian memperlihatkan bahwa digitalisasi manajemen SHE memiliki posisi ganda sebagai safety capability dan operational capability. Dari perspektif STS, kontribusi terbesar bukan berasal dari teknologi sebagai artefak, melainkan dari kemampuan sistem digital mengubah pola koordinasi manusia, kualitas informasi, dan kejelasan tanggung jawab. Platform yang hanya mengubah formulir kertas menjadi formulir elektronik cenderung menghasilkan digitization tanpa transformation. Sebaliknya, sistem yang mengintegrasikan hazard, permit, inspection, corrective action, kompetensi, dan dashboard menjadikan data sebagai bagian dari control loop pekerjaan. Argumentasi ini konsisten dengan Clegg (2000) dan dengan temuan Industry 4.0 yang menekankan pentingnya integrasi teknis-organisasional (Badri et al., 2018; Arana-Landín et al., 2023).

Koefisien DMS→SP yang paling besar mengindikasikan bahwa nilai strategis digitalisasi SHE terutama berasal dari peningkatan kualitas preventive control. Real-time visibility mempercepat identifikasi deviasi; workflow yang terstandardisasi mengurangi variasi pelaksanaan; dan traceability memperkuat accountability. Namun, hasil ini tidak berarti teknologi menggantikan budaya keselamatan. Safety performance tetap dibentuk oleh leadership, climate, knowledge, motivation, dan reinforcement. Bukti dari pekerja alat berat di Kalimantan Timur, pekerja tambang, dan pekerja industri Indonesia menunjukkan bahwa faktor kepemimpinan dan iklim tetap kritis (Puspitarini & Martiana, 2024; Azis et al., 2025; Sridadi et al., 2024). Oleh sebab itu, digitalisasi seharusnya dipakai untuk memperkuat dialog keselamatan, coaching, dan learning, bukan sekadar memperketat pengawasan.

Efek DMS→EO yang tetap signifikan setelah memasukkan SP menunjukkan adanya manfaat proses yang independen dari outcome keselamatan. Misalnya, satu data source untuk inspection dan action tracking dapat mengurangi pengulangan input dan waktu konsolidasi. Mobile capture mengurangi jeda antara kondisi lapangan dan laporan. Dashboard mengurangi waktu pencarian informasi ketika prioritas harus ditetapkan. Integrasi tersebut sesuai dengan konsep digital transformation sebagai perubahan proses dan pengambilan keputusan berbasis data (Vial, 2019; Verhoef et al., 2021). Studi manufaktur dan perusahaan juga menunjukkan bahwa manfaat digital terhadap efisiensi dan kinerja bergantung pada kemampuan organisasi mengintegrasikan teknologi dengan business process dan organizational capital (Zhang et al., 2023; Zareie et al., 2024).

Efek mediasi SP menjelaskan mengapa investasi keselamatan dapat menghasilkan operational value. Proses yang lebih aman cenderung memiliki variasi yang lebih rendah, lebih sedikit interruption, dan lebih kuat dalam mendeteksi error sebelum berkembang menjadi kegagalan. Dengan demikian, organisasi tidak perlu mempertentangkan safety versus productivity. Dalam desain yang tepat, safety performance menjadi reliability mechanism yang mendukung efisiensi. Perspektif ini sejalan dengan Fernández-Muñiz et al. (2009) serta meta-analisis Christian et al. (2009), yang menempatkan faktor organisasi dan situasional sebagai determinan penting safety outcome. Hasil ini juga relevan dengan pendekatan safety leadership modern yang menekankan pembentukan perilaku melalui komunikasi dan coaching (Clarke, 2013; Moon, 2024).

Implikasi spesifik bagi konteks Batu Hijau Project adalah kebutuhan arsitektur digital-SHE yang modular tetapi terintegrasi. Tahap pertama adalah membangun master data dan taxonomy yang seragam untuk hazard, risk control, location, equipment, work group, dan action owner. Tahap kedua adalah mobile-first frontline capture dengan desain minimum-click agar pelaporan tidak menambah beban. Tahap ketiga adalah closed-loop workflow yang menghubungkan inspection finding, risk rating, due date, evidence, verification, dan escalation. Tahap keempat adalah dashboard leading indicators yang memprioritaskan overdue high-risk action, repeat finding, barrier health, exposure trend, dan response time. Tahap kelima adalah analytics untuk mendeteksi pola, bukan untuk menggantikan professional judgment. Pendekatan bertahap ini konsisten dengan arah digital mining yang mengandalkan real-time data dan integrasi sistem (Barnewold & Lottermoser, 2020; Flores-Castañeda et al., 2025).

Tata kelola menjadi syarat terakhir. Sistem harus memiliki data owner, definisi KPI yang konsisten, kontrol akses berbasis peran, audit trail, standard response time, mekanisme data-quality review, serta proses management of change. Risiko baru seperti alarm fatigue, digital distraction, cybersecurity, dan over-reliance perlu diperlakukan sebagai bagian dari risk assessment. Literatur Industry 4.0 menegaskan bahwa teknologi dapat sekaligus menciptakan manfaat dan emerging risks (Zorzenon et al., 2022; Bispo & Amaral, 2024; Koh & Tan, 2024). Karena itu, desain digital-SHE yang matang harus menjaga keseimbangan antara automation dan human oversight serta tetap mengacu pada kerangka continual improvement ISO 45001 (ISO, 2018).

Implikasi Manajerial

Secara manajerial, prioritas implementasi sebaiknya dimulai dari pain point yang memiliki nilai keselamatan dan nilai operasi sekaligus. Empat use case dengan expected value tinggi adalah digital inspection, corrective action management, electronic permit-to-work integration, dan mobile near-miss/hazard reporting. Keberhasilan tidak cukup diukur melalui jumlah form digital atau jumlah user login, tetapi melalui reduction in closure time, lower overdue rate, faster decision response, repeat-finding reduction, dan penurunan jam administratif. Di sisi sumber daya manusia, supervisor perlu dilatih membaca leading indicators dan menggunakan dashboard untuk coaching. Temuan Subramaniam et al. (2023) dan Moon (2024) menegaskan bahwa knowledge, motivation, dan leadership intervention tetap penting, sehingga technology adoption harus berjalan bersama capability development.

Untuk menjaga fokus bisnis, steering committee digital-SHE dapat menggunakan benefit-realization dashboard yang memisahkan tiga kelompok outcome, safety outcome, process efficiency, dan adoption quality. Safety outcome mencakup high-risk finding closure, repeat hazard, dan safety behavior. Process efficiency mencakup cycle time, rework, waiting, dan administration hours. Adoption quality mencakup data completeness, active users, response SLA, dan system usability. Model tiga kelompok ini mencegah bias yang hanya mengejar tingkat penggunaan aplikasi tanpa memastikan outcome. Pada konteks Trakindo yang secara resmi menempatkan SHE sebagai bagian dari upaya mengoptimalkan operasi, pendekatan ini relevan untuk menghubungkan komitmen keselamatan dengan continuous improvement yang terukur (PT Trakindo Utama, n.d., 2023).

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa digitalisasi manajemen SHE berpotensi menjadi strategi simultan untuk meningkatkan safety performance dan efisiensi operasional pada konteks jasa alat berat di Batu Hijau Project. Hasil model menunjukkan pengaruh positif DMS terhadap SP ($\beta = 0,718$) dan EO ($\beta = 0,415$), serta pengaruh positif SP terhadap EO ($\beta = 0,459$). Safety performance memediasi sebagian pengaruh digitalisasi terhadap efisiensi dengan efek tidak langsung $\beta = 0,329$. Secara keseluruhan, model menjelaskan 51,6% variasi safety performance dan 65,6% variasi efisiensi operasional. Temuan ini mendukung argumentasi bahwa keselamatan dapat berfungsi sebagai reliability mechanism yang mengubah kualitas kontrol risiko menjadi kelancaran proses operasi.

Kontribusi utama penelitian adalah memperluas pembahasan transformasi digital dari fokus teknologi menuju desain sosio-teknis SHE yang menghubungkan manusia, proses, data, dan governance. Digitalisasi yang paling bernilai bukan sekadar paperless, melainkan sistem yang menciptakan single source of truth, memperpendek feedback loop, mengintegrasikan tindakan korektif, dan menyediakan leading indicators untuk keputusan operasional. Implementasi sebaiknya memprioritaskan use case dengan dual value: menurunkan risiko sekaligus mengurangi waktu tunggu, rework, dan beban administrasi.

Keterbatasan utama naskah ini adalah penggunaan dataset simulasi terkalibrasi pada tahap pengembangan model. Karena itu, koefisien kuantitatif harus direestimasi menggunakan data primer Batu Hijau Project sebelum dipakai sebagai dasar keputusan manajemen atau klaim kinerja perusahaan. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan data longitudinal yang menggabungkan survei, log aplikasi, safety leading indicators, incident data, work-order cycle time, equipment downtime, dan cost-of-delay. Pendekatan tersebut akan memungkinkan pengujian apakah manfaat digital-SHE bertahan dari tahap adopsi menuju routinization dan apakah hubungan safety-to-efficiency berbeda menurut jenis pekerjaan, shift, pengalaman, dan level risiko.

DAFTAR REFERENSI

1. Arana-Landín, G., Laskurain-Iturbe, I., Iturrate, M., & Landeta-Manzano, B. (2023). Assessing the influence of Industry 4.0 technologies on occupational health and safety. *Heliyon*, 9(3), e13720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13720>
2. Azis, A. H., Arifuddin, N. F., H, A. W. P., & Ahmad, M. F. (2025). Pengaruh karakteristik individu dan safety leadership dengan motivasi kerja terhadap safety performance pekerja tambang. *Jurnal Manajemen Kesehatan Indonesia*, 13(1), 39–51. <https://doi.org/10.14710/jmki.13.1.2025.39-51>
3. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the Industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
4. Barnewold, L., & Lottermoser, B. G. (2020). Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(6), 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>

5. Bharadwaj, A., El Sawy, O. A., Pavlou, P. A., & Venkatraman, N. (2013). Digital business strategy: Toward a next generation of insights. *MIS Quarterly*, 37(2), 471–482. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37:2.3>
6. Bispo, L. G. M., & Amaral, F. G. (2024). The impact of Industry 4.0 on occupational health and safety: A systematic literature review. *Journal of Safety Research*, 90, 254–271. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.04.009>
7. Christian, M. S., Bradley, J. C., Wallace, J. C., & Burke, M. J. (2009). Workplace safety: A meta-analysis of the roles of person and situation factors. *Journal of Applied Psychology*, 94(5), 1103–1127. <https://doi.org/10.1037/a0016172>
8. Clarke, S. (2013). Safety leadership: A meta-analytic review of transformational and transactional leadership styles as antecedents of safety behaviours. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*, 86(1), 22–49. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8325.2012.02064.x>
9. Clegg, C. W. (2000). Sociotechnical principles for system design. *Applied Ergonomics*, 31(5), 463–477. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00009-0)
10. Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
11. Fernández-Muñiz, B., Montes-Peón, J. M., & Vázquez-Ordás, C. J. (2009). Relation between occupational safety management and firm performance. *Safety Science*, 47(7), 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.022>
12. Flores-Castañeda, R. O., Olaya-Cotera, S., López-Porras, M., Tarmeño-Juscamaita, E., & Iparraguirre-Villanueva, O. (2025). Technological advances and trends in the mining industry: A systematic review. *Mineral Economics*, 38(2), 221–236. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00455-w>
13. Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
14. Fugas, C. S., Silva, S. A., & Meliá, J. L. (2012). Another look at safety climate and safety behavior: Deepening the cognitive and social mediator mechanisms. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.08.013>
15. Griffin, M. A., & Neal, A. (2000). Perceptions of safety at work: A framework for linking safety climate to safety performance, knowledge, and motivation. *Journal of Occupational Health Psychology*, 5(3), 347–358. <https://doi.org/10.1037/1076-8998.5.3.347>
16. Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2–24. <https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203>
17. Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). *Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R: A workbook*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7>
18. Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the*

- Academy of Marketing Science*, 43(1), 115–135. <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
19. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.
20. Koh, D., & Tan, A. (2024). Applications and impact of Industry 4.0: Technological innovations in occupational safety and health. *Safety and Health at Work*, 15(4), 379–381. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.09.001>
21. Moon, K. (2024). Effect of a safety leadership training including coaching on safety performance and climate in wood-processing companies. *Safety and Health at Work*, 15(3), 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.05.005>
22. Neal, A., & Griffin, M. A. (2006). A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels. *Journal of Applied Psychology*, 91(4), 946–953. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.91.4.946>
23. Neal, A., Griffin, M. A., & Hart, P. M. (2000). The impact of organizational climate on safety climate and individual behavior. *Safety Science*, 34(1–3), 99–109. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00008-4)
24. Nur, S. D., Tui, R. N. S., & Anas, A. V. (2026). Integrating performance scorecard and real-time web-based monitoring for haulage operator optimization: A case study at PT Vale Indonesia Tbk. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73, 78. <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00948-1>
25. PT Trakindo Utama. (n.d.). *Safety, health & environment*. Retrieved August 10, 2026, from <https://trakindo.co.id/safety-health-environment>
26. PT Trakindo Utama. (2023, September 13). *Advancing customer productivity: Trakindo hands over machines Re-Frame CAT 793C to PT Amman Mineral Nusa Tenggara*. <https://trakindo.co.id/advancing-customer-productivity-trakindo-hands-over-machines-re-frame-cat-793c-to-pt-amman-mineral-nusa-tenggara>
27. Puspitarini, M. Y., & Martiana, T. (2024). Safety climate and safety leadership influence on safety performance in East Kalimantan heavy equipment employees. *Media Gizi Kesmas*, 13(2), 641–651. <https://doi.org/10.20473/mgk.v13i2.2024.641-651>
28. Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020). Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(5), 1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
29. Sridadi, A. R., Himmawan, M. F., Ninglasari, S. Y., & Fiqqih, M. N. (2024). The mediating role of workplace safety climate on safety leadership and safety knowledge in Indonesian petrochemical employees. *The Journal of Behavioral Science*, 19(2), 75–88.
30. Subramaniam, C., Johari, J., Mashhi, M. S., & Mohamad, R. (2023). The influence of safety leadership on nurses' safety behavior: The mediating role of safety knowledge and motivation. *Journal of Safety Research*, 84, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.013>
31. Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., & Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and

- research agenda. *Journal of Business Research*, 122, 889–901. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022>
32. Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118–144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
33. Vinodkumar, M. N., & Bhasi, M. (2010). Safety management practices and safety behaviour: Assessing the mediating role of safety knowledge and motivation. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 2082–2093. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.06.021>
34. Warner, K. S. R., & Wäger, M. (2019). Building dynamic capabilities for digital transformation: An ongoing process of strategic renewal. *Long Range Planning*, 52(3), 326–349. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2018.12.001>
35. Zareie, M., Attig, N., El Ghouli, S., & Fooladi, I. (2024). Firm digital transformation and corporate performance: The moderating effect of organizational capital. *Finance Research Letters*, 61, 105032. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105032>
36. Zeng, C., Wu, Y., & Zhang, M. (2024). Corporate digital transformation and safety production performance: Empirical evidence from A-share listed companies. *China Journal of Accounting Studies*, 12(1), 164–198. <https://doi.org/10.1080/21697213.2023.2300288>
37. Zhang, T., Shi, Z.-Z., Shi, Y.-R., & Chen, N.-J. (2022). Enterprise digital transformation and production efficiency: Mechanism analysis and empirical research. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35(1), 2781–2792. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1980731>
38. Zhang, Y., Ma, X., Pang, J., Xing, H., & Wang, J. (2023). The impact of digital transformation of manufacturing on corporate performance – The mediating effect of business model innovation and the moderating effect of innovation capability. *Research in International Business and Finance*, 64, 101890. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.101890>
39. Zohar, D. (1980). Safety climate in industrial organizations: Theoretical and applied implications. *Journal of Applied Psychology*, 65(1), 96–102. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.65.1.96>
40. Zorzenon, R., Lizarelli, F. L., & Moura, D. B. A. de A. (2022). What is the potential impact of Industry 4.0 on health and safety at work? *Safety Science*, 153, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105802>