

Identifikasi Faktor Pengaruh Teknologi Digital dalam Keselamatan dan Kesehatan Konstruksi: Validasi Awal melalui Pendekatan *Expert*

Z. Mufidah¹, T.N. Handayani^{1*}, A. Saputra²

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: tantri.n.h@ugm.ac.id

INTISARI

Pemanfaatan teknologi digital dalam upaya mitigasi risiko semakin mendapat perhatian sebagai solusi untuk meningkatkan kinerja keselamatan di bidang konstruksi. Namun, penerapannya dalam manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada sektor konstruksi di Indonesia belum dikaji sepenuhnya. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi faktor-faktor yang memengaruhi teknologi digital terhadap Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada sektor konstruksi di Indonesia. Metode yang digunakan adalah studi literatur yang terstruktur guna pengumpulan data sekunder, serta validasi oleh 5 ahli (*expert*) yang fokus terhadap teknologi dan K3 melalui wawancara sistematis untuk memvalidasi dan mendapatkan pandangan faktor-faktor penting, hasil penelitian menunjukkan terdapat 15 jenis teknologi digital keselamatan yang valid, 9 faktor manfaat implementasi, 11 hambatan implementasi, dan 7 strategi implementasi teknologi digital keselamatan yang dianggap sebagai faktor penting. Implikasi dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan penting kepada pembuat kebijakan, asosiasi sektor konstruksi, dan perusahaan konstruksi terkait implementasi dan potensi *trade-off* yang terlibat dalam implementasi teknologi untuk meningkatkan kinerja keselamatan dan kesehatan kerja pada sektor konstruksi.

Kata kunci: manajemen konstruksi; K3; wawancara sistematis; teknologi digital.

1 PENDAHULUAN

Sektor konstruksi merupakan kontributor utama dalam penunjang perekonomian secara global (McKinsey & Company, 2017). Tercatat pada triwulan I Badan Pusat Statistik, (2023) sebesar 9,88% sektor konstruksi menyumbang PDB Indonesia. Dengan demikian sektor konstruksi mempunyai peran yang vital dalam hal keberlanjutan. Sebaliknya karena sifatnya yang kompleks, dinamis, dan unik sektor konstruksi juga merupakan salah satu sektor yang rentan terhadap risiko kecelakaan kerja (Brunette, 2004). Hal tersebut membuat pekerja konstruksi rentan terhadap paparan potensi risiko keselamatan dan kesehatan yang berbahaya di lingkungan kerja. Sebuah studi yang dilakukan Neale & Gurmu, (2022) menyatakan bahwa sektor konstruksi pada umumnya lebih mengutamakan produktivitas dibandingkan keselamatan karena adanya tekanan produksi, masalah tersebut mengakibatkan lingkungan kerja yang rawan kecelakaan dan kurangnya perilaku aman oleh pekerja. Sementara studi yang dilakukan oleh Nnaji & Karakhan, (2020) mengungkapkan bahwa tantangan negatif yang dihadapi oleh pekerja konstruksi berpengaruh secara langsung terhadap produktivitas dan kualitas pekerjaan yang dihasilkan. Hal tersebut memperkuat bahwa manajemen keselamatan merupakan elemen penting dari kesuksesan proyek secara menyeluruh.

Upaya dalam meminimalisir tingginya angka kecelakaan kerja pada sektor konstruksi telah dilakukan oleh profesional konstruksi sesuai dengan berbagai peraturan perundang-undangan. Jin dkk., (2019) melakukan studi kasus untuk menguji dan memverifikasi pendekatan yang digunakan dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa representasi dan pemodelan dari BIM 4D mendukung perencanaan keselamatan yang lebih efektif serta memungkinkan penerapan berbagai strategi mitigasi risiko selama proses konstruksi. AL-Sahar dkk., (2021) menganalisis penerapan teknologi yang dapat dikenakan (*wearable technology*) dalam memantau keselamatan di lokasi konstruksi melalui wawancara virtual oleh ahli, teknik pemungutan suara, dan analisis data historis. Hasil penelitian menunjukkan teknologi tersebut terbukti bermanfaat dalam mendeteksi, mencegah risiko, dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik. sebagaimana dalam penelitian Haupt dkk., (2019), Reyes-Veras dkk., (2021) dan Aghimien dkk., (2022) Dalam penelitian tersebut menganalisis jenis dari teknologi digital keselamatan pada sektor konstruksi, dimana meskipun terdapat tantangan dalam implementasinya, teknologi digital dan otomatisasi dapat meningkatkan keselamatan dan kinerja konstruksi, namun hanya berfokus ke salah satu aspek atau teknologi tertentu saja.

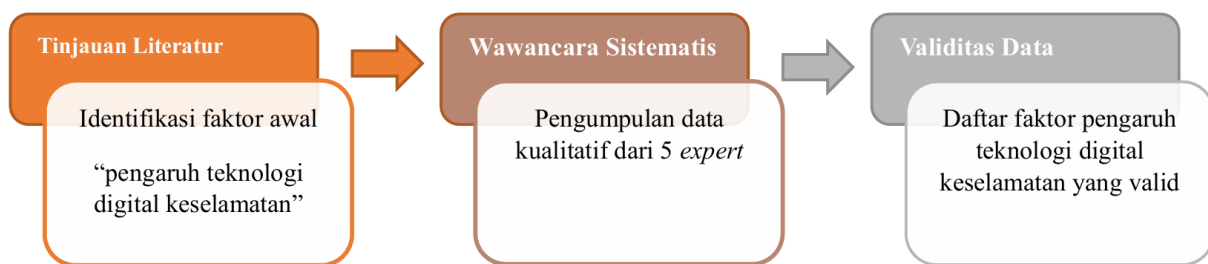
Kajian terhadap publikasi terkait manajemen keselamatan di sektor konstruksi menunjukkan tren yang jelas dalam pemanfaatan teknologi. Dimana penelitian di bidang ini terus berkembang karena teknologi dinilai memiliki potensi besar dalam meningkatkan kinerja keselamatan (Awolusi dkk, 2018; Nnaji dkk, 2019). Nnaji & Karakhan, (2020) mengidentifikasi manfaat, hambatan, dan keterbatasan adopsi teknologi keselamatan, serta menemukan peningkatan,

namun masih adanya retensi terhadap penggunaannya secara keberlanjutan di industri konstruksi. Sejalan dengan penelitian terbaru menyatakan bahwa strategi inovatif dapat memperbaiki kinerja manajemen keselamatan dalam pembangunan yang berkelanjutan dengan mengimplementasikan teknologi digital (Babalola dkk, 2023; Nikmehr dkk, 2021). Namun pemanfaatan teknologi pada sektor konstruksi di Indonesia belum meluas, karena masih dalam tahap transisi dari jasa konstruksi ke industri konstruksi yang mengakibatkan adopsi metode konvensional masih banyak digunakan. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi dalam pengelolaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) tidak mungkin bisa dilaksanakan tanpa mengetahui faktor-faktor pengaruh implementasi teknologi digital. Hal tersebut yang mendasari perlunya penelitian komprehensif terkait praktik digitalisasi dalam kinerja keselamatan proyek konstruksi terutama di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pandangan para *expert* atau profesional konstruksi yang fokus terhadap teknologi dan K3, serta memiliki peran manajerial pada perusahaan – perusahaan konstruksi di Indonesia. Penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi faktor-faktor penting yang memengaruhi penerapan teknologi digital dalam keselamatan sektor konstruksi termasuk jenis teknologi, manfaat, hambatan, strategi implementasi, dan memberikan nilai tambah bagi penelitian sebelumnya yang masih terbatas dalam mengeksplorasi strategi implementasi teknologi keselamatan di sektor ini.

2 METODE PENELITIAN

Untuk menjawab tujuan dari penelitian ini, digunakan metode penelitian kualitatif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Metode ini terdiri dari studi literatur dan analisis konten yang tersedia mengenai topik tersebut dan wawancara sistematis terhadap para profesional atau *expert* konstruksi yang fokus akan teknologi dan K3 serta terlibat dalam manajerial di perusahaan – perusahaan konstruksi di Indonesia.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

2.1 Tinjauan Literatur

Pertama, dilakukan studi literatur secara integratif dengan fokus pada teknologi keselamatan dan penelitian terbaru dalam manajemen keselamatan di sektor konstruksi. Tinjauan literatur integratif merupakan metodologi yang komprehensif dengan menggabungkan data dari literatur empiris dan teoritis guna meninjau temuan berbasis bukti, pengembangan konseptual, serta menganalisis masalah tentang topik tertentu (Tavares De Souza dkk, 2010; Torraco, 2005). Proses peninjauan ini digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kritis awal yang terkait dengan implementasi teknologi keselamatan pada sektor konstruksi. Dari hasil tinjauan yang berfokus pada penggunaan teknologi digital dalam manajemen keselamatan, dengan rentang waktu dibatasi dari 2020 hingga 2023 sebanyak 9 jurnal dipilih sebagai sumber utama dalam pembahasan penelitian ini.

2.2 Wawancara Sistematis

Setelah dilakukan tinjauan integratif pada literatur terkait, wawancara sistematis dikembangkan untuk validasi data kualitatif yang diperoleh dari opini, pengalaman, wawasan, sikap, perilaku, proses, prediksi, dan harapan dari profesional atau *expert* yang fokus terhadap teknologi dan K3 serta terlibat dalam manajerial, mengenai faktor-faktor yang memengaruhi implementasi teknologi dalam manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada sektor konstruksi. Wawancara yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi lima bagian utama. Bagian pertama, informasi demografi responden, bagian kedua jenis-jenis pemanfaatan teknologi keselamatan, bagian ketiga manfaat implementasi teknologi keselamatan, bagian empat hambatan implementasi, dan bagian lima strategi implementasi. Para ahli menilai validitas faktor-faktor tersebut serta kesesuaian instrumen penelitian dengan teknologi dalam manajemen K3 konstruksi di Indonesia. Validasi ini memastikan bahwa setiap bias diminimalkan dan isi wawancara konsisten dengan istilah teknis untuk mendapatkan profesional atau *expert* dengan kriteria utama terbukti memiliki

pengetahuan tentang salah satu teknologi keselamatan dan kesehatan kerja yang tercantum dalam daftar identifikasi faktor awal.

2.3 Validitas Data

Data yang diperoleh dari para *expert* divalidasi untuk mengevaluasi dan merangkum masukan dari para *expert*. Validasi ini digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kritis yang relevan dengan implementasi teknologi digital keselamatan berdasarkan pandangan kualitatif para *expert*. Dalam pendekatan ini, ditetapkan prinsip kesesuaian, konvergensi konten, atau pandangan, dimana faktor-faktor yang mendapatkan kesepakatan mayoritas dari *expert* dianggap sebagai faktor valid. Pandangan tersebut tidak hanya mencakup persetujuan terhadap faktor yang telah diidentifikasi dari literatur, tetapi juga mempertimbangkan masukan tambahan dari para *expert* yang mungkin mengusulkan faktor baru atau menyarankan modifikasi faktor awal yang teridentifikasi. Hasil dari validitas data adalah kerangka faktor-faktor yang telah disempurnakan berdasarkan kombinasi antara data literatur dan pandangan praktis dari para *expert*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Responden

Sebanyak 5 *expert* yang fokus terhadap teknologi atau K3 serta terlibat dalam manajerial di beberapa perusahaan konstruksi di Indonesia menanggapi survei tersebut. Jabatan fungsional *expert* terdiri dari Manajer Proyek, QHSE Manajer, Asisten QHSE Engineer, Staff Pengendali, dan Construction Engineer, sebagaimana pada Tabel 1. Manfaat dari melibatkan responden dengan berbagai latar belakang tersebut adalah memastikan bahwa temuan yang ada dapat mengurangi setiap potensi bias dan isi survei konsisten dengan istilah teknis. Sebagian *expert* memiliki pengalaman lebih dari 5 tahun di sektor konstruksi, yang dianggap wajar untuk analisis survey berbasis opini seperti ini (Bohari dkk., 2020). Semua *expert* memverifikasi bahwa pernah terlibat langsung dalam proyek konstruksi dengan implementasi teknologi digital yang digunakan sebagai bagian dari proses manajemen keselamatan dan kesehatan kerja sebagai kriteria utama, yang mengindikasikan bahwa mereka secara umum sadar dan memiliki pengetahuan yang cukup tentang area penelitian.

Tabel 1. Demografi *expert*.

Karakteristik Demografi			
No	Peran dalam Proyek	Jenis Organisasi / Perusahaan	Pengalaman Kerja (Tahun)
1	Manajer Proyek	Pemilik Proyek / Owner	8
2	QHSE Manajer	Kontraktor BUMN	15
3	Asisten QHSE Engineer	Konsultan Swasta	9
4	Staff Pengendali	Pemilik Proyek / Owner	3
5	Construction Engineer	Kontraktor BUMN	4

3.2 Teknologi Digital untuk Manajemen Keselamatan pada Sektor Konstruksi

Studi ini melakukan identifikasi dari tinjauan literatur, diperoleh 18 teknologi yang dapat meningkatkan manajemen K3 sebagai fungsi primer atau sekunder. Daftar lengkap teknologi keselamatan yang teridentifikasi dapat ditemukan dalam Tabel 3. Namun, setelah *expert* memverifikasi hanya 15 teknologi yang dinyatakan valid, sementara 3 teknologi kurang memenuhi kriteria diantaranya (TD5) *Robotic and Automation*, (TD6) *Wearable Sensing Devices*, dan (TD15) *Exoskeletons*. *Expert* 1,3,4 dan 5 menyatakan meskipun teknologi *Robotic and Automation* memiliki potensi dalam meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja, infrastruktur dan ekosistem yang ada masih belum sepenuhnya mendukung implementasinya dalam proyek konstruksi di Indonesia, sementara *expert* 2 sebagai seorang QHSE Manajer berpendapat implementasi teknologi tersebut dalam konstruksi sudah diterapkan dalam bentuk penggunaan *launcher*, yang merupakan bagian dari sistem otomasi. Perbedaan pendapat juga terlihat dalam implementasi (TD6) *Wearable Sensing Devices*. Dimana ;''*expert* 2,3 dan 4 berpendapat teknologi *Wearable* membutuhkan kalibrasi perangkat yang dapat mempersulit pengelolaan keselamatan, sehingga masih memerlukan kajian lebih lanjut untuk implementasinya. Sebaliknya *expert* 1 dan 5 dimana sebagai seorang Manajer Proyek dan Construction Engineer sepakat bahwa teknologi *Wearable* memiliki potensi untuk diimplementasikan di proyek konstruksi, karena memungkinkan pengawasan yang lebih baik. Namun, mereka menyoroti akan tingginya biaya pengadaan. Sementara dalam penggunaan (TD15) *Exoskeletons* keseluruhan *expert* sepakat dalam praktik di lapangan, pekerja konstruksi umumnya lebih memilih Alat Pelindung Diri (APD) yang sederhana seperti helm dan

rompi reflektif yang dianggap tidak menghambat mobilitas, penggunaan teknologi yang terlalu kompleks berisiko mengurangi kenyamanan dan efisiensi kerja.

Meskipun tiga teknologi tersebut belum memenuhi kriteria validasi, beberapa *expert* mengakui potensi penerapannya di masa depan. Oleh karena itu, kajian lebih lanjut diperlukan untuk mendukung adopsinya di sektor konstruksi.

3.3 Manfaat Implementasi Teknologi Digital untuk Manajemen Keselamatan pada Sektor Konstruksi

Berdasarkan validasi yang dilakukan oleh 5 *expert*, semua faktor manfaat implementasi dianggap memiliki kaitan dengan penggunaan teknologi digital keselamatan dan dapat diterima, 9 manfaat implementasi tersebut tercantum pada Tabel 2. Namun, terdapat perbedaan pendapat yang cukup mencolok pada beberapa faktor manfaat. Di antaranya, mayoritas *expert* setuju dengan faktor (M6) Memperbaiki proses investigasi kecelakaan, karena teknologi memiliki peran yang penting dalam memperbaiki proses investigasi, terutama dalam penggantian metode konvensional yang selama ini digunakan. Namun, terdapat pandangan yang berbeda dari *expert* 2 yang berpendapat bahwa investigasi dianggap memiliki pendekatan yang berbeda. Sebagai seorang QHSE Manager sekaligus investigator, *expert* 2 lebih menekankan pada pendekatan yang sistematis dan terperinci dalam investigasi. Kemudian faktor (M9) Melindungi pekerja dari bahaya, sebagian *expert* menyatakan bahwa teknologi memiliki peran penting dalam aspek ini, terutama dalam sistem visualisasi ataupun digital. Namun, terdapat pula perbedaan pandangan dari *expert* 2 yang berpendapat bahwa teknologi tidak secara langsung melindungi pekerja dari bahaya, namun berperan dalam mengurangi potensi bahaya yang dampaknya dapat dirasakan melalui pengelola dan pelaksana di lapangan.

Tabel 2. Manfaat implementasi teknologi digital keselamatan.

Kode	Faktor	Studi literatur				Validasi <i>Expert</i>					Σ	Hasil Validasi
		L1	L2	L4	L7	E1	E2	E3	E4	E5		
M1	Meningkatkan pemantauan, inspeksi, dan peringatan keselamatan kerja	√	√	√	√	S	S	S	S	S	5	Valid
M2	Peningkatan perencanaan keselamatan & identifikasi bahaya di awal proyek	√	√	√	√	S	S	S	S	S	5	Valid
M3	Meningkatkan komunikasi keselamatan antar-pekerja atau staff	√	√	√	√	S	S	S	S	S	5	Valid
M4	Meningkatkan kesadaran pekerja akan bahaya	√	√		√	S	S	S	S	S	5	Valid
M5	Meningkatkan pelatihan keselamatan	√	√			S	S	S	S	S	5	Valid
M6	Memperbaiki proses investigasi kecelakaan	√	√		√	S	TS	S	S	S	4	Valid
M7	Meningkatkan kualitas, kompleksitas, dan frekuensi pelaporan keselamatan	√	√	√		S	S	S	S	S	5	Valid
M8	Membantu memvisualisasikan bahaya	√	√			S	S	S	S	S	5	Valid
M9	Melindungi pekerja dari bahaya	√	√			S	TS	S	S	S	4	Valid

3.4 Hambatan Implementasi Teknologi Digital untuk Manajemen Keselamatan pada Sektor Konstruksi

Empat belas hambatan implementasi teknologi digital keselamatan diidentifikasi dari tinjauan literatur yang dijelaskan pada Tabel 3. Beberapa *expert* mengindikasikan bahwa terdapat 3 hambatan yang dianggap tidak terlalu berpengaruh terhadap implementasi teknologi digital keselamatan, diantaranya (H6) Keraguan mengenai kinerja dari teknologi, (H7) Keamanan dan privasi data yang tidak terjamin, dan (H14) Kurangnya kesempatan untuk mempelajari atau menguji teknologi. Sebagian *expert* menyatakan bahwa (H6) Keraguan mengenai kinerja dari teknologi bukan suatu hambatan, karena keraguan terhadap penggunaan teknologi dapat diminimalisir dengan pendekatan empiris sebelum mengadopsi suatu teknologi. Sementara sebagai seorang Asisten QHSE Engineer, *expert* 2 berpendapat bahwa faktor tersebut menjadi sebuah tantangan, terutama bagi pekerja yang belum terbiasa dengan inovasi teknologi digital. Selanjutnya, itu faktor (H7) Keamanan dan privasi data yang tidak terjamin, sebagian besar *expert* menyatakan bahwa pengendalian dan privasi data dapat dikelola dengan baik untuk mencegah kebocoran data. Serta faktor hambatan (H14) Kurangnya kesempatan untuk mempelajari atau menguji teknologi. Terdapat perbedaan pendapat mengenai faktor tersebut, menurut *expert* 1,2 dan 4 dalam perusahaan konstruksi tidak membatasi adanya pengembangan teknologi digital, sehingga peluang untuk berkembang sangat terbuka namun keputusan terkait kesesuaian dengan perkembangan tersebut akan dipertimbangan lebih lanjut, namun *expert* 2 dan 5 dimana sebagai seorang Asisten QHSE Engineer dan Construction Engineer, menyatakan bahwa hambatan ini tetap relevan, terutama bagi pekerja yang tidak memiliki akses atau dukungan yang memadai untuk menguji teknologi.

Tabel 3. Jenis teknologi dan Hambatan implementasi teknologi digital keselamatan.

Kategori	Kode	Faktor	Studi Literatur									Validasi <i>Expert</i>					Σ	Hasil Validasi
			L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	E1	E2	E3	E4	E5		
Jenis Teknologi Digital Keselamatan	TD1	AR/VR/AV	√	√	√	√		√	√	√		S	S	TS	S	S	4	Valid
	TD2	Building Information Modeling (BIM)	√	√		√		√	√	√		S	S	S	S	TS	4	Valid
	TD3	Radio Frequency Identification (RFID)	√	√	√	√			√	√		S	S	TS	S	TS	3	Valid
	TD4	Unmanned Aerial Vehicles (Drone)	√	√	√	√			√	√		S	S	S	S	S	5	Valid
	TD5	R&A (Robotics and Automation)	√	√	√	√			√	√		TS	S	TS	TS	TS	1	TidakValid
	TD6	Wearable Sensing Devices (WSDs)	√	√	√				√	√		S	TS	TS	TS	S	2	TidakValid
	TD7	Sistem Pengawasan Keselamatan Otomatis	√	√	√	√			√			S	S	TS	S	TS	3	Valid
	TD8	Laser Scanning and LiDAR (Light Detection and Ranging)	√	√					√	√		S	S	TS	S	TS	3	Valid
	TD9	CCTV	√	√						√		S	S	S	S	S	5	Valid
	TD10	Papan Informasi Digital	√	√						√		S	TS	S	S	TS	3	Valid
	TD11	Fotogrametri	√	√					√			S	S	TS	S	S	4	Valid
	TD12	Perangkat Mobile di Lokasi Proyek	√	√		√						S	S	S	S	TS	4	Valid
	TD13	Aplikasi Keselamatan dan Izin Kerja				√		√	√			S	S	S	S	TS	4	Valid
	TD14	Quick Response Codes (QR)	√	√								S	S	S	TS	S	4	Valid
	TD15	Exoskeletons/Exosuits (EXO)	√	√	√							TS	TS	TS	TS	TS	0	TidakValid
	TD16	Sistem Informasi Geografis (GIS)				√			√			S	S	S	S	TS	4	Valid
	TD17	Sensor Pintar dan Jaringan Nirkabel				√			√			S	S	S	S	S	5	Valid
	TD18	Online Database							√			TS	S	S	S	TS	3	Valid
Hambatan Implementasi Teknologi Digital	H1	Biaya yang besar untuk mengadopsi teknologi.	√	√	√	√	√	√	√		√	S	S	S	S	S	5	Valid
	H2	Kurang atau tidak adanya peraturan perundang-undangan dari pemerintah atau klien untuk penggunaan teknologi.	√	√	√	√	√	√	√		√	S	S	S	S	TS	4	Valid
	H3	Budaya kerja dan usia tenaga kerja yang enggan terhadap inovasi/beradaptasi dengan teknologi baru.	√	√	√	√	√		√		√	S	S	S	S	TS	4	Valid
	H4	Perlu pelatihan dan pembelajaran yang ekstensif.	√	√	√	√	√		√		√	S	S	S	S	TS	4	Valid
	H5	Kekhawatiran mengenai ketersediaan dukungan teknis dan staf terampil.	√			√	√	√	√		√	S	S	S	S	S	5	Valid
	H6	Keraguan mengenai kinerja dari teknologi.	√	√			√		√		√	TS	TS	S	TS	TS	1	TidakValid
	H7	Keamanan dan privasi data yang tidak terjamin.		√			√		√		√	TS	TS	TS	TS	TS	1	TidakValid
	H8	Kesulitan penggunaan teknologi.	√		√						√	S	S	S	S	TS	4	Valid
	H9	Kurangnya informasi tentang efektivitas teknologi.	√		√				√			S	S	S	S	TS	4	Valid
	H10	Keterbatasan standar dan pedoman operasional.		√	√				√			S	TS	S	S	S	4	Valid
	H11	Kesulitan pengelolaan keselamatan pada proyek berskala besar.				√			√		√	S	TS	S	S	S	4	Valid
	H12	Kurangnya pengetahuan dan kesadaran.				√	√		√			S	S	S	S	S	5	Valid
	H13	Lebih memilih metode konvensional.	√			√						S	S	S	S	TS	4	Valid
	H14	Kurangnya kesempatan untuk mempelajari atau menguji teknologi.	√		√							S	TS	S	TS	S	3	TidakValid

3.5 Strategi Implementasi Teknologi Digital untuk Manajemen Keselamatan pada Sektor Konstruksi

Studi mengidentifikasi strategi implementasi teknologi keselamatan dari literatur yang dipaparkan dalam Tabel 4, dan para *expert* juga diminta untuk menilai kesesuaian strategi tersebut untuk mengatasi hambatan yang ada. Namun seluruh *expert* sepakat bahwa faktor (S4) Model pembayaran berlangganan yang fleksibel, tidak dianggap sebagai strategi yang efektif dalam mengatasi hambatan biaya dalam adopsi teknologi, sebagian *expert* setuju bahwa perusahaan harus mengalokasikan lebih banyak dana untuk berinvestasi pada teknologi keselamatan. Serta *expert* 1, 4, dan 5 dimana sebagai seorang Manajer Proyek, Staff Pengendali, dan *Construction Engineer*, mereka merekomendasikan strategi (S8) Membagi tim ke dalam beberapa segmen dengan pengawasan berbasis teknologi, tetapi tetap terkoordinasi dalam satu sistem terpusat untuk melengkapi strategi yang ada. Namun, secara keseluruhan para *expert* sepakat bahwa strategi-strategi tersebut dapat diterima dan dapat diimplementasikan secara efektif di proyek konstruksi.

Tabel 4. Strategi implementasi teknologi digital keselamatan.

Kode	Faktor	Studi Literatur				Validasi <i>Expert</i>					Σ	Hasil Validasi
		L4	L5	L6	L7	E1	E2	E3	E4	E5		
S1	Pelatihan kepada pekerja dengan memberikan wawasan tentang pentingnya dan kegunaan teknologi.	√		√	√	S	S	S	S	S	8	Valid
S2	Peningkatan regulasi dan persyaratan kontrak dari pemerintah atau klien untuk penggunaan teknologi dalam Manajemen K3 Konstruksi.	√		√		S	S	S	S	S	6	Valid
S3	Perusahaan/organisasi harus mengalokasikan lebih banyak dana untuk berinvestasi pada teknologi baru yang dapat meningkatkan kinerja keselamatan.		√		√	S	S	S	S	S	7	Valid
S4	Model pembayaran berlangganan yang fleksibel.	√				TS	TS	TS	TS	TS	0	TidakValid
S5	Meminta informasi analisis biaya-manfaat dari penyedia teknologi, untuk mengurangi keraguan terhadap keandalan teknologi.	√				S	S	S	S	S	6	Valid
S6	Menyeimbangkan struktur tim dengan mengombinasikan generasi pekerja yang lebih berpengalaman dan terbiasa dengan teknologi untuk mendorong adopsi teknologi.	√				S	S	S	S	S	6	Valid
S7	Untuk memastikan bahwa dukungan teknis yang memadai tersedia dari vendor teknologi, perusahaan konstruksi harus mendapatkan semua informasi yang relevan dari vendor (penyedia teknologi) sebelum memutuskan untuk mengadopsi dan menggunakan suatu teknologi.	√				S	S	S	S	S	6	Valid
S8	membagi tim ke dalam beberapa segmen dengan pengawasan berbasis teknologi, tetapi tetap terkoordinasi dalam satu sistem terpusat.					√			√	√	3	Valid

Catatan : "L1" (Nnaji & Karakhan, 2020) ; "L2" (Saeed dkk., 2021) ; "L3" (Agyekum dkk., 2022) ; "L4" (Malomane dkk., 2022) ; "L5" (Mittal & Tripathi, 2023) ; "L6" (Adebiyi dkk., 2023) ; "L7" (Yap, Lee, & Wang, 2023) ; "L8" (Yap dkk., 2022) ; "L9" (Yap dkk., 2023) ; "E1" Manajer Proyek ; "E2" QHSE Manajer ; "E3" Asisten QHSE Engineer ; "E4" Staff Pengendali ; "E5" Construction Engineer ; " Σ " Jumlah ; "S" Setuju ; "TS" Tidak Setuju.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi implementasi teknologi digital dalam manajemen keselamatan konstruksi, mencakup jenis teknologi, manfaat, hambatan, dan strategi untuk mendukung penerapannya secara berkelanjutan. Survei terhadap 5 *expert* konstruksi dengan pengalaman dalam teknologi keselamatan mengungkap 15 jenis teknologi digital yang berpotensi diimplementasikan, diklasifikasikan ke dalam teknologi pemodelan dan manajemen data, pemantauan dan identifikasi lapangan, serta automasi dan kendali cerdas. Penelitian

ini juga memvalidasi 9 manfaat teknologi keselamatan, mencakup peningkatan pemantauan bahaya, kesadaran dan komunikasi, serta pengelolaan keselamatan. Selanjutnya, terdapat 11 hambatan implementasi yang dikelompokkan dalam aspek finansial dan regulasi, teknis dan operasional, serta sumber daya manusia dan budaya kerja. Untuk mengatasinya, disarankan 7 strategi, termasuk dukungan finansial dan regulasi, peningkatan kapasitas teknis, serta pengembangan SDM dan budaya teknologi.

Penelitian ini memiliki keterbatasan, selain dalam cakupan validasi yang dilakukan, jumlah wawancara lebih banyak diperlukan untuk penelitian selanjutnya. Studi ini berfokus pada perspektif karyawan yang terlibat manajerial, mengingat peran krusial mereka dalam pengambilan keputusan terkait adopsi dan implementasi teknologi dalam manajemen keselamatan. Sebagaimana Nnaji dkk., (2019) menyatakan bahwa keberhasilan adopsi teknologi merupakan gabungan dari pendekatan *top-down* dan *bottom-up*, penelitian dimasa depan dapat berkonsentrasi pada perspektif pekerja lapangan untuk menghasilkan informasi berharga yang dapat melengkapi temuan ini. Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi beberapa teknologi yang belum tervalidasi namun berpotensi untuk diterapkan di masa depan, sehingga studi lanjutan perlu mengevaluasi kesiapan infrastruktur, biaya, dan budaya kerja untuk mendukung implementasinya. Namun demikian, penelitian ini memberikan wawasan berharga bagi pembuat kebijakan, asosiasi, dan perusahaan konstruksi dalam mengimplementasikan teknologi guna meningkatkan manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada sektor konstruksi.

REFERENSI

- Adebiyi, R. T., Amuda-Yusuf, G., & Rasheed, A. S. (2023). *Level of Application of Technologies for Health and Safety Management on Construction Sites in Lagos State, Nigeria*. <https://www.researchgate.net/publication/379644020>
- Aghimien, D., Ikuabe, M., Aghimien, L. M., Aigbavboa, C., Ngcobo, N., & Yankah, J. (2022). PLS-SEM assessment of the impediments of robotics and automation deployment for effective construction health and safety. *Journal of Facilities Management*. <https://doi.org/10.1108/JFM-04-2022-0037>
- Agyekum, K., Pittri, H., Botchway, E. A., Amudjie, J., Kumah, V. M. A., Kotei-Martin, J. N., & Oduro, R. A. (2022). Exploring the Current Technologies Essential for Health and Safety in the Ghanaian Construction Industry. *Merits*, 2(4), 314–330. <https://doi.org/10.3390/merits2040022>
- AL-Sahar, F., Przeglasińska, A., & Krzemiński, M. (2021). Risk assessment on the construction site with the use of wearable technologies. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3411–3417. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.006>
- Awolusi, I., Marks, E., & Hallowell, M. (2018). Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. *Automation in Construction*, 85, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.010>
- Babalola, A., Manu, P., Cheung, C., Yunusa-Kaltungo, A., & Bartolo, P. (2023). A systematic review of the application of immersive technologies for safety and health management in the construction sector. *Journal of Safety Research*, 85, 66–85. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.01.007>
- Badan Pusat Statistik (Vols. 17, Nomor 3, 2023). (2023). ©Badan Pusat Statistik/BPS-Statistics Indonesia.
- Bohari, A. A. M., Skitmore, M., Xia, B., Teo, M., & Khalil, N. (2020). Key stakeholder values in encouraging green orientation of construction procurement. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122246>
- Brunette, M. J. (2004). Construction safety research in the United States: Targeting the Hispanic workforce. *Injury Prevention*, 10(4), 244–248. <https://doi.org/10.1136/ip.2004.005389>
- Haupt, T. C., Akinlolu, M., & Raliile, M. T. (2019). Applications of digital technologies for health and safety management in construction. *World Construction Symposium*, 88–97. <https://doi.org/10.31705/WCS.2019.9>
- Jin, Z., Gambatese, J., Liu, D., & Dharmapalan, V. (2019). Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(11), 2637–2654. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2018-0379>
- Malomane, R., Musonda, I., & Okoro, C. S. (2022). The Opportunities and Challenges Associated with the Implementation of Fourth Industrial Revolution Technologies to Manage Health and Safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph19020846>
- McKinsey & Company. (2017). *MGI-Reinventing-construction-A-route-to-higher-productivity-Full-report*.
- Mittal, Y. K., & Tripathi, P. (2023). Leading Technologies Adoption in Construction Safety Management. *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2023)*, 299–307. <https://doi.org/10.29117/cic.2023.0042>

- Neale, J., & Gurmu, A. (2022). Production pressures in the building sector of the construction industry: a systematic review of literature. In *Journal of Engineering, Design and Technology* (Vol. 20, Issue 6, pp. 1412–1429). Emerald Publishing. <https://doi.org/10.1108/JEDT-12-2020-0529>
- Nikmehr, B., Hosseini, M. R., Martek, I., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2021). Digitalization as a strategic means of achieving sustainable efficiencies in construction management: A critical review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13095040>
- Nnaji, C., & Karakhan, A. A. (2020). Technologies for safety and health management in construction: Current use, implementation benefits and limitations, and adoption barriers. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101212>
- Nnaji, C., Okpala, I., & Kim, S. (2019). A Simulation Framework for Technology Adoption Decision Making in Construction Management: A Composite Model. *Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019*, 499–506. <https://doi.org/10.1061/9780784482421.063>
- Reyes-Veras, P. F., Renukappa, S., & Suresh, S. (2021). Challenges faced by the adoption of big data in the Dominican Republic construction industry: An empirical study. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 812–831. <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.044>
- Saeed, Y., Aziz, E., & Zelentsov, L. (2021). Technology role in safety management of Iraqi construction projects. *E3S Web of Conferences*, 263. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126304043>
- Tavares De Souza, M., Dias Da Silva, M., & De Carvalho, R. (2010). *Integrative review: what is it? How to do it?* (Vol. 8, Issue 1).
- Torraco, R. J. (2005). Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. *Human Resource Development Review*, 4(3), 356–367. <https://doi.org/10.1177/1534484305278283>
- Yap, J. B. H., Lam, C. G. Y., Skitmore, M., & Talebian, N. (2022). BARRIERS TO THE ADOPTION OF NEW SAFETY TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: A DEVELOPING COUNTRY CONTEXT. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(2), 120–133. <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16014>
- Yap, J. B. H., Lee, K. P. H., Skitmore, M., Lew, Y. L., Lee, W. P., & Lester, D. (2023). PREDICTORS TO INCREASE SAFETY TECHNOLOGY ADOPTION IN CONSTRUCTION: AN EXPLORATORY FACTOR ANALYSIS FOR MALAYSIA. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(2), 157–170. <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.18053>
- Yap, J. B. H., Lee, K. P. H., & Wang, C. (2023). Safety enablers using emerging technologies in construction projects: empirical study in Malaysia. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(5), 1414–1440. <https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2021-0379>

LAMPIRAN

Tabel 1. Pengelompokan jenis teknologi digital keselamatan.

No	Klasifikasi Teknologi	Jenis Teknologi
1	Pemodelan dan manajemen data	BIM, LiDAR, Fotogrametri, GIS, dan Online Database
2	Pemantauan dan identifikasi di lapangan	RFID, Drone, CCTV, Papan Informasi Digital, Perangkat Mobile, Aplikasi Keselamatan dan Izin Kerja, QR, dan Sensor Pintar
3	Automasi dan kendali cerdas	AR/VR dan Sistem Pengawasan Keselamatan Otomatis

Tabel 2. Pengelompokan manfaat implementasi teknologi digital keselamatan.

No	Kategori Manfaat	Jenis Manfaat
1	Peningkatan pemantauan dan identifikasi bahaya	M1 Meningkatkan pemantauan, inspeksi, dan peringatan keselamatan kerja.
		M2 Peningkatan perencanaan keselamatan & identifikasi bahaya di awal proyek.
		M6 Memperbaiki proses investigasi kecelakaan.
		M7 Meningkatkan kualitas, kompleksitas, dan frekuensi pelaporan keselamatan.
		M8 Membantu memvisualisasikan bahaya.
2	Peningkatan kesadaran dan komunikasi	M3 Meningkatkan komunikasi keselamatan antar-pekerja atau staf.
		M4 Meningkatkan kesadaran pekerja akan bahaya.
		M5 Peningkatan pelatihan keselamatan.
3	Pengelolaan & perlindungan	M9 Melindungi pekerja dari bahaya.

Tabel 3. Pengelompokan hambatan implementasi teknologi digital keselamatan.

No	Kategori Hambaran	Jenis Hambatan
1	Finansial dan regulasi	H1 Biaya yang besar untuk mengadopsi teknologi.
		H2 Tidak adanya pemerintah atau klien untuk penggunaan teknologi.
		H10 Memperbaiki proses investigasi kecelakaan.
2	Teknis dan operasional	H5 Kekhawatiran mengenai ketersediaan dukungan teknis dan staf terampil.
		H8 Kesulitan penggunaan teknologi.
		H9 Kurangnya informasi tentang efektivitas teknologi.
		H11 Kesulitan pengelolaan keselamatan pada proyek berskala besar.
3	Sumber daya manusia dan budaya kerja	H3 Budaya & usia tenaga kerja yang enggan terhadap inovasi dengan teknologi.
		H4 Perlu pelatihan dan pembelajaran yang ekstensif.
		H12 Kurangnya pengetahuan dan kesadaran.
		H13 Lebih memilih metode konvensional.

Tabel 4. Pengelompokan strategi implementasi teknologi digital keselamatan

No	Kategori Strategi	Jenis Strategi
1	Pendukung finansial dan regulasi	H1 Peningkatan regulasi dan persyaratan kontrak dari pemerintah atau klien untuk penggunaan teknologi dalam Manajemen K3 Konstruksi.
		H2 Perusahaan/organisasi harus mengalokasikan lebih banyak dana untuk berinvestasi pada teknologi baru yang dapat meningkatkan kinerja keselamatan.
		H10 Meminta informasi analisis biaya-manfaat dari penyedia teknologi, untuk mengurangi keraguan terhadap keandalan teknologi.
2	Peningkatan kapasitas teknis & operasional	H5 memastikan bahwa dukungan teknis yang memadai tersedia dari vendor teknologi, perusahaan konstruksi harus mendapatkan semua informasi yang relevan dari vendor sebelum memutuskan untuk mengadopsi dan menggunakan suatu teknologi.
		H8 Membagi tim ke dalam beberapa segmen dengan pengawasan berbasis teknologi, tetapi tetap terkoordinasi dalam satu sistem terpusat.
3	Pengembangan SDM dan budaya teknologi	H9 Pelatihan kepada pekerja dengan memberikan wawasan tentang pentingnya teknologi.
		H11 Menyeimbangkan struktur tim dengan mengombinasikan generasi pekerja yang lebih berpengalaman dan terbiasa dengan teknologi untuk mendorong adopsi teknologi.