

Identifikasi Faktor Risiko Keselamatan pada Konstruksi Rekayasa Berat

Joggi Theophilus Purba^{*}, Ronald Marcush Sihite, Pungky Dharma Saputra

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia, 16810

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 13 Mei 2025
Revisi Akhir: 18 Oktober 2025
Diterbitkan Online: 28 Oktober 2025

KATA KUNCI

Faktor Risiko Keselamatan
Konstruksi Rekayasa Berat
Keselamatan Konstruksi

KORESPONDENSI

E-mail: joggipurba095@gmail.com

A B S T R A K

Tujuan dari kajian literatur ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor risiko keselamatan yang terkait dengan proyek konstruksi rekayasa berat, dengan penekanan pada rekayasa sipil dan proyek infrastruktur besar. Studi ini menganalisis faktor-faktor kunci yang mempengaruhi risiko keselamatan, termasuk manajemen, peralatan, pelatihan, lingkungan kerja, dan keterampilan pekerja. Melalui pendekatan kualitatif, berbagai studi yang relevan ditinjau untuk memahami bagaimana faktor-faktor ini mempengaruhi hasil keselamatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa manajemen keselamatan yang efektif, penggunaan peralatan yang tepat, pelatihan yang komprehensif, dan lingkungan kerja yang aman sangat penting untuk meminimalkan risiko dan mencegah kecelakaan di lokasi konstruksi. Selain itu, integrasi teknologi canggih seperti Building Information Modeling (BIM) dan alat penilaian risiko diakui sebagai hal yang krusial untuk meningkatkan protokol keselamatan. Penelitian ini memberikan pemahaman mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi risiko keselamatan dalam industri konstruksi dan menyediakan dasar untuk penelitian lebih lanjut guna meningkatkan standar keselamatan melalui penerapan teknologi dan praktik manajemen yang lebih efektif.

PENDAHULUAN

Konstruksi rekayasa berat, yang mencakup pembangunan infrastruktur seperti jembatan, terowongan, dan gedung bertingkat tinggi, adalah sektor dengan tingkat kecelakaan kerja yang tinggi. Meskipun berbagai inovasi teknologi dan prosedur keselamatan telah diterapkan, risiko kecelakaan tetap tinggi, terutama yang melibatkan penggunaan alat berat dalam lingkungan konstruksi yang berbahaya. Sebagai contoh, data menunjukkan bahwa kecelakaan sering terjadi akibat kegagalan alat berat atau ketidaktepatan dalam pengoperasian mesin, yang mengarah pada cedera atau kematian pekerja [1],[2]. Oleh karena itu, penting untuk memahami dan mengelola faktor risiko keselamatan di sektor ini.

Objek penelitian ini tentang proyek konstruksi rekayasa berat yang melibatkan penggunaan alat berat dan pekerjaan berisiko tinggi di lokasi seperti jembatan, terowongan, dan proyek infrastruktur lainnya. Dalam konteks ini, keselamatan pekerja, serta pengelolaan dan pemeliharaan alat berat, menjadi objek utama yang perlu dikelola secara sistematis untuk meminimalkan potensi kecelakaan. Penggunaan alat berat yang tidak memenuhi standar atau prosedur pengoperasian yang kurang tepat dapat menjadi faktor utama penyebab kecelakaan di lokasi proyek konstruksi [3],[4].

Tingginya angka kecelakaan kerja adalah masalah utama yang dihadapi oleh industri ini, yang dapat mengakibatkan kerugian fisik maupun finansial yang signifikan. Kecelakaan pada konstruksi rekayasa berat, seperti yang sering terjadi pada proyek terowongan dan jembatan, biasanya disebabkan oleh penggunaan alat berat yang tidak terstandarisasi, kelalaian operasional, serta kurangnya pelatihan keselamatan yang memadai bagi pekerja [5],[6]. Selain itu, pengelolaan risiko yang kurang efektif juga turut memperburuk masalah ini, sehingga meningkatkan potensi terjadinya kecelakaan.

Dampak dari kecelakaan kerja dalam konstruksi sangat luas, baik terhadap keselamatan pekerja maupun terhadap kelancaran dan anggaran proyek. Setiap kecelakaan yang terjadi dapat menyebabkan cedera serius, bahkan kematian

pekerja, yang tidak hanya mempengaruhi produktivitas tetapi juga menyebabkan keterlambatan pada penyelesaian proyek serta pembengkakan biaya [7],[8]. Sebagai tambahan, kecelakaan yang terjadi juga dapat merusak reputasi perusahaan konstruksi dan mengurangi peluang untuk mendapatkan kontrak di masa depan.

Penyebab dari tingginya angka kecelakaan ini beragam, dengan faktor manusia, organisasi, dan alat berat sebagai penyebab utama. Faktor manusia meliputi kurangnya pelatihan yang memadai, kelalaian pekerja, serta ketidaktahuan terhadap potensi bahaya yang ada di lokasi konstruksi. Faktor organisasi, seperti pengelolaan keselamatan yang tidak memadai dan lemahnya pengawasan terhadap penerapan prosedur keselamatan, turut memperburuk situasi. Selain itu, alat berat yang tidak memenuhi standar atau digunakan dengan cara yang salah dapat meningkatkan risiko kecelakaan yang lebih besar [9],[10].

Solusi yang dapat diterapkan untuk mengurangi kecelakaan ini adalah dengan memanfaatkan teknologi canggih dan pendekatan manajerial yang lebih efektif. Pemanfaatan *Building Information Modeling (BIM)* dapat menjadi salah satu cara yang efektif untuk memetakan dan meramalkan risiko keselamatan dalam proyek konstruksi rekayasa berat. Dengan BIM, manajer proyek dapat lebih mudah mengidentifikasi potensi risiko keselamatan dan merencanakan tindakan preventif untuk menghindari kecelakaan [2],[11]. Penggunaan teknologi seperti machine learning untuk prediksi dan deteksi dini terhadap potensi risiko juga dapat memperbaiki manajemen keselamatan di lokasi proyek [12],[8].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor risiko keselamatan dalam konstruksi rekayasa berat, menganalisis penyebab utama kecelakaan yang terjadi, serta mengevaluasi pendekatan dan solusi yang dapat diterapkan untuk meningkatkan keselamatan di lokasi konstruksi. Penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan rekomendasi yang berbasis data dan teknologi untuk memperbaiki sistem manajemen keselamatan di proyek konstruksi besar [14],[15]. Dengan demikian, diharapkan proyek konstruksi dapat berjalan lebih efisien dan aman.

Implikasi dari penelitian ini adalah penerapan teknologi terbaru dan sistem manajerial yang lebih baik dalam mengelola risiko keselamatan dapat mengurangi angka kecelakaan dan meningkatkan produktivitas proyek. Selain itu, dengan menggunakan solusi berbasis data dan teknologi, perusahaan konstruksi dapat meningkatkan kinerja keselamatan yang pada akhirnya dapat mengurangi biaya proyek dan meningkatkan keuntungan jangka panjang [16],[15]. Implementasi solusi ini dapat menjadi langkah penting dalam mengubah standar keselamatan di industri konstruksi dan mendukung keberlanjutan proyek besar secara global.

METODOLOGI

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) dengan teknik sintesis deskriptif untuk mengidentifikasi faktor-faktor risiko keselamatan pada proyek konstruksi rekayasa berat. Sebanyak 113 artikel dari jurnal terpilih dianalisis secara sistematis untuk menelusuri pola dan frekuensi kemunculan faktor risiko. Meskipun istilah *meta-analisis* digunakan, penelitian ini tidak melakukan penggabungan data statistik, melainkan menerapkan sintesis kualitatif guna mengintegrasikan temuan-temuan dari berbagai studi sebelumnya. Metode ini memberikan pemahaman mendalam tentang isu keselamatan melalui penggabungan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan konteks proyek rekayasa berat.

Variabel Penelitian

Keselamatan kerja dalam konstruksi rekayasa berat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama. Manajemen yang baik memastikan pengawasan, perencanaan, dan kepatuhan terhadap standar keselamatan. Peralatan yang terawat dan sesuai standar mengurangi risiko kecelakaan akibat kegagalan teknis. Pelatihan yang memadai meningkatkan pemahaman pekerja terhadap prosedur keselamatan dan penggunaan alat yang benar. Lingkungan kerja, termasuk kondisi cuaca dan lokasi proyek, juga berperan dalam menentukan tingkat risiko. Sementara itu, keterampilan pekerja yang memadai mencegah kesalahan operasional yang dapat membahayakan keselamatan. Kelima faktor ini saling berkaitan dalam menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman di sektor konstruksi berat. Dapat dilihat dalam Tabel 1. dari variable tersebut memiliki kode, manajemen (X1), peralatan (X2), pelatihan (X3), Lingkungan (X4) dan keterampilan (X5).

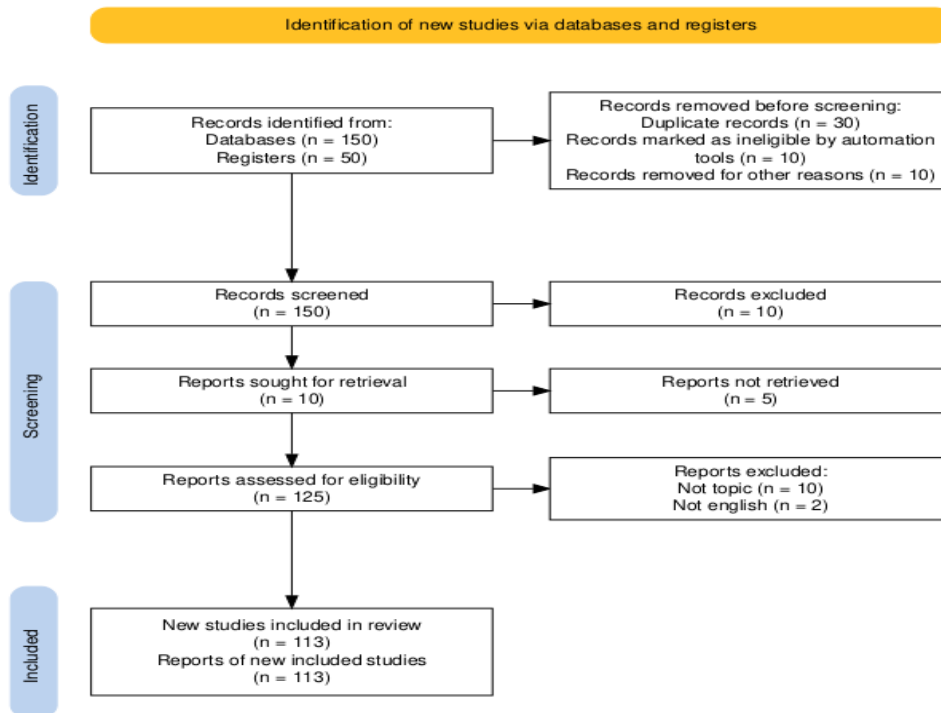
Tabel 1. Variabel Penelitian

Kode	Variabel	Deskripsi	Referensi
X1	Manajemen	Manajemen yang baik dalam proyek konstruksi mencakup perencanaan yang matang, pengawasan ketat, serta koordinasi antar tim untuk memastikan pekerjaan berjalan aman dan efisien.	[1], [2], [7], [8], [9], [10], [13], [13], [15], [16], [17], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [30], [33], [35], [37], [40], [41], [42], [43], [46], [47], [48], [49], [51], [55], [57], [59], [65], [66], [68], [75], [78], [80], [82], [86], [89], [91], [94], [96], [98], [99], [99], [101], [103], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [114]
X2	Peralatan	Peralatan yang digunakan harus tersedia dalam kondisi baik, sesuai standar keselamatan, dan rutin dipelihara agar tidak menimbulkan risiko kecelakaan kerja.	[1], [2], [7], [8], [9], [10], [13], [13], [15], [16], [17], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [30], [33], [35], [37], [40], [41], [42], [43], [46], [47], [48], [49], [51], [55], [57], [59], [65], [66], [68], [75], [78], [80], [82], [86], [89], [91], [94], [96], [98], [99], [99], [101], [103], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [114]
X3	Pelatihan	Pekerja harus mendapatkan pelatihan yang memadai terkait keselamatan kerja dan penggunaan alat agar dapat bekerja dengan efisien dan mengurangi potensi kecelakaan.	[3], [4], [29], [30], [37], [53], [54], [58], [60], [67], [69], [70], [76], [79], [81], [83], [84], [85], [87], [88], [90], [92], [95], [97], [100], [102], [104]
X4	Lingkungan	Faktor lingkungan seperti cuaca, kebisingan, dan kualitas udara harus dikelola dengan baik karena dapat mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan pekerja di lapangan.	[2], [7], [10], [11], [17], [22], [26], [31], [36], [38], [39], [40], [43], [56], [59], [60], [61], [62], [63], [73], [77]
X5	Keterampilan	Pekerja yang memiliki keterampilan tinggi lebih mampu menjalankan tugas dengan baik, memahami prosedur keselamatan, dan mengoperasikan alat dengan benar, sehingga risiko kecelakaan dapat diminimalkan.	[2], [7], [10], [11], [17], [22], [26], [31], [36], [38], [39], [40], [43], [56], [59], [60], [61], [62], [63], [73], [77]

Manajemen keselamatan, dengan fokus pada pengendalian risiko dan pengawasan yang ketat, memegang peranan penting dalam mencegah kecelakaan kerja. Selain itu, peralatan yang memenuhi standar keselamatan dan diperiksa secara rutin membantu mengurangi potensi kecelakaan teknis yang bisa terjadi. Pelatihan yang baik juga memastikan pekerja lebih paham tentang bahaya yang ada dan cara menghadapi situasi berisiko. Meskipun faktor seperti keterampilan pekerja dan kondisi lingkungan kerja memiliki pengaruh yang lebih kecil, keduanya tetap menjadi bagian penting dalam menciptakan tempat kerja yang lebih aman, seperti yang dijelaskan dalam Tabel 1.

Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini mengadopsi desain *Systematic Literature Review (SLR)*, dengan pendekatan *PRISMA*, untuk mengkaji literatur yang relevan mengenai faktor risiko keselamatan dalam konstruksi rekayasa berat. *PRISMA* digunakan untuk memberikan transparansi dalam proses seleksi, pengumpulan, dan analisis data dari artikel yang relevan dan memenuhi kriteria inklusi tertentu. Proses ini melibatkan identifikasi, seleksi, evaluasi kualitas, dan sintesis hasil dari berbagai studi yang relevan dalam konteks keselamatan konstruksi.



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

Proses pemilihan jurnal yang ditunjukkan dalam diagram alir ini mengikuti metode *Systematic Literature Review (SLR)* dengan pendekatan *PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)*, yang dapat dilihat pada Gambar 1. Pada tahap pertama, pencarian jurnal dilakukan menggunakan kata kunci yang relevan melalui database, menghasilkan 200 artikel jurnal. Kemudian, proses screening dilakukan untuk memilih jurnal yang memenuhi kriteria awal, diikuti dengan penilaian kelayakan dari teks lengkap jurnal. Hanya jurnal yang sesuai dengan tujuan penelitian yang dilanjutkan ke tahap berikutnya, yang mengarah pada seleksi akhir 113 artikel ilmiah terpilih. Proses ini mencerminkan penerapan metodologi yang hati-hati dan terorganisir untuk memilih literatur yang sesuai dengan topik penelitian, sesuai dengan pedoman *PRISMA*.

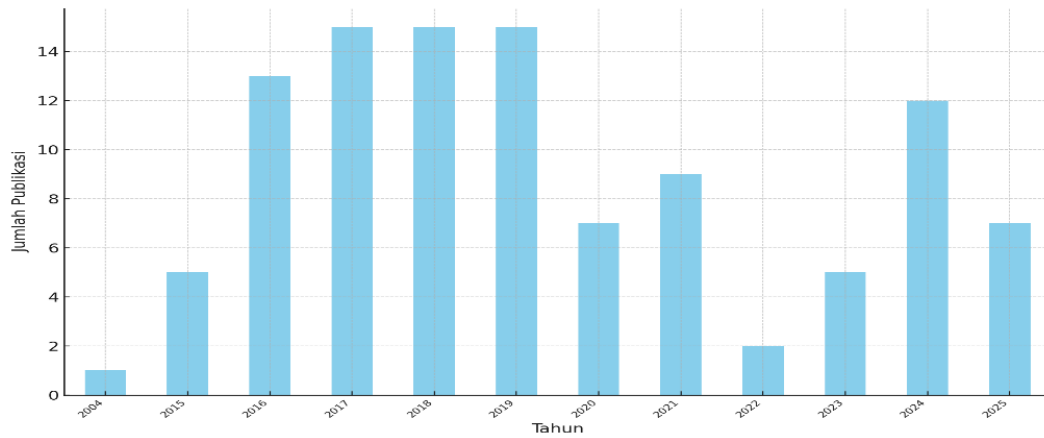
Teknik Analisis Data

Dalam penelitian meta-analisis ini, data yang telah dikumpulkan sebanyak 113 artikel jurnal dianalisis menggunakan pendekatan meta-analisis, yang memungkinkan integrasi berbagai hasil penelitian sebelumnya guna menemukan pola umum dalam faktor risiko keselamatan. Proses analisis dimulai dengan melakukan pengkodean terhadap faktor risiko yang diidentifikasi dari berbagai literatur. Faktor-faktor ini kemudian dikelompokkan berdasarkan kategori risiko, seperti risiko lingkungan, manajemen, manusia, pelatihan dan keterampilan. Selanjutnya, dilakukan analisis deskriptif untuk memahami distribusi dan frekuensi kemunculan masing-masing faktor dalam literatur yang ditinjau. Analisis statistik sederhana juga digunakan untuk mengidentifikasi faktor risiko yang paling dominan dan memiliki dampak signifikan terhadap keselamatan dalam konstruksi rekayasa berat. Selain itu, dilakukan perbandingan terhadap temuan dari berbagai penelitian guna mengidentifikasi tren atau pola yang muncul dalam risiko keselamatan proyek rekayasa berat. Hasil analisis ini digunakan untuk menyusun rekomendasi mitigasi risiko yang berbasis bukti, dengan mempertimbangkan best practice yang telah diimplementasikan dalam berbagai proyek konstruksi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan strategi keselamatan kerja yang lebih efektif dan berbasis data dalam proyek konstruksi rekayasa berat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

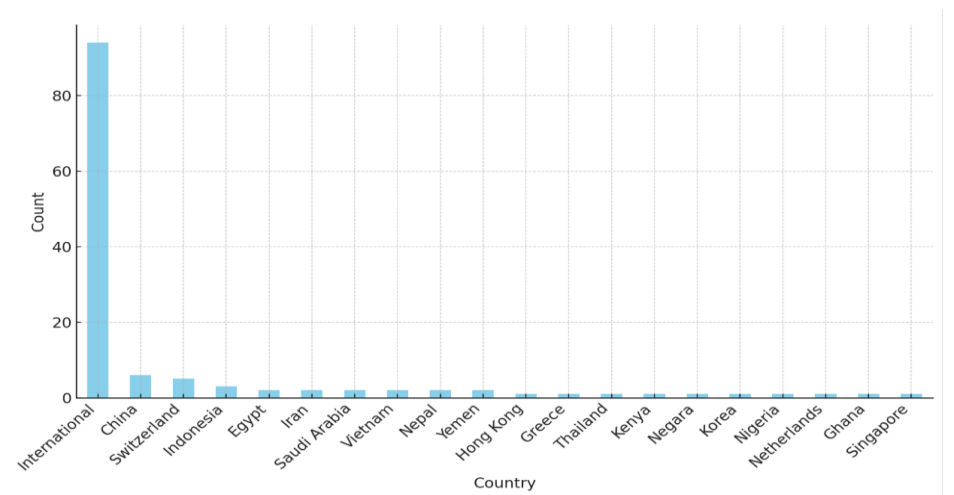
Hasil Penelitian

Penelitian ini melakukan meta-analisis terhadap berbagai studi yang meneliti pola dan penyebab kecelakaan kerja dalam proyek konstruksi gedung. Berdasarkan hasil analisis, kecelakaan kerja dapat dikategorikan ke dalam lima faktor utama: faktor Manajemen, faktor lingkungan, faktor peralatan, faktor pelatihan, dan faktor keterampilan.



Gambar 3. Katagori Jurnal Berdasarkan Tahun

Gambaran jelas tentang tren publikasi dari tahun ke tahun. Terlihat bahwa jumlah publikasi meningkat pesat pada tahun 2015, kemudian menurun pada tahun berikutnya dengan fluktuasi yang terlihat antara 2020 hingga 2025. Dapat kita lihat pada Gambar 3. Kenaikan yang signifikan pada tahun 2015 menunjukkan peningkatan minat dalam penelitian keselamatan konstruksi pada periode tersebut, mungkin dipengaruhi oleh peristiwa atau perkembangan dalam industri yang meningkatkan kesadaran akan pentingnya keselamatan dalam proyek konstruksi. Penurunan dan fluktuasi yang terjadi setelahnya bisa jadi disebabkan oleh faktor eksternal atau perubahan dalam kebijakan dan prioritas penelitian.



Gambar 4. Katagori Jurnal Berdasarkan Negara

Jumlah publikasi per negara, dengan *Internasional* sebagai negara dengan jumlah publikasi terbesar, diikuti oleh negara-negara seperti *Iran* dan *Saudi Arabia*. *Indonesia* juga muncul dengan jumlah publikasi yang signifikan. Gambar 4. menunjukkan bahwa riset dan perkembangan di bidang keselamatan konstruksi dan manajemen risiko sangat berkembang di berbagai negara. Adanya dominasi internasional menandakan bahwa topik ini adalah isu global yang menarik perhatian banyak negara, dengan beberapa negara masih mendominasi dalam hal kontribusi publikasi.

Meta analisis

Penelitian ini melakukan meta-analisis terhadap berbagai studi yang meneliti pola dan penyebab kecelakaan kerja dalam proyek konstruksi gedung. Berdasarkan hasil analisis, kecelakaan kerja dapat dikategorikan ke dalam lima faktor utama: faktor Manajemen, faktor lingkungan, faktor peralatan, factor pelatihan, dan factor keterampilan.

Tabel 2. Tabel Meta Analisis

Referensi	Tahun	x1	x2	x3	x4	x5
[1]	2025	✓				
[5]	2025	✓				
[13]	2025	✓	✓			
[3]	2025	✓		✓		
[4]	2025	✓		✓		
[2]	2025	✓	✓		✓	
[11]	2025	✓			✓	
[6]	2024	✓				✓
Referensi	Tahun	x1	x2	x3	x4	x5
[7]	2024		✓		✓	
[17]	2024	✓	✓		✓	
[9]	2024		✓			
[14]	2024	✓				
[10]	2024		✓		✓	
[12]	2024	✓				
[22]	2024	✓			✓	
[25]	2024	✓	✓			
[8]	2024		✓			✓
Referensi	Tahun	x1	x2	x3	x4	x5
[16]	2024		✓			
[26]	2024		✓		✓	
[15]	2024	✓	✓			
[27]	2023		✓			
[110]	2023	✓	✓			
[111]	2023	✓	✓			
[21]	2023	✓	✓			
[13]	2023	✓	✓			
[28]	2022	✓	✓			
[29]	2022	✓		✓		
[30]	2021	✓	✓	✓		
[31]	2021	✓			✓	
[32]	2021	✓				
[33]	2021		✓			
[34]	2021			✓		
[35]	2021				✓	
[36]	2021		✓			✓
[37]	2021			✓	✓	
[38]	2021		✓			✓
[39]	2020		✓			✓
[40]	2021		✓	✓		✓
[41]	2020		✓	✓		
[42]	2020			✓		
[43]	2020			✓		✓
[44]	2020					
[45]	2020		✓			
[46]	2020		✓	✓		
[47]	2019			✓		
[48]	2019		✓	✓		
[49]	2019		✓	✓		
[50]	2019					✓
[51]	2019		✓	✓		
[52]	2019		✓			
[53]	2019				✓	
[54]	2019				✓	
[55]	2019			✓		
Referensi	Tahun	x1	x2	x3	x4	x5
[56]	2019				✓	
[57]	2019		✓	✓		
[58]	2019		✓		✓	
[59]	2019			✓		✓
[60]	2019			✓	✓	
[61]	2019				✓	
[62]	2018		✓		✓	
[63]	2018		✓		✓	
[64]	2018		✓			
[24]	2018			✓		
[20]	2018		✓			✓
[65]	2018		✓	✓		

[66]	2018	✓	✓
[67]	2018	✓	✓
[68]	2018	✓	✓
[69]	2018	✓	✓
[23]	2018	✓	✓
[70]	2018	✓	✓
[71]	2018	✓	✓
[72]	2018	✓	
[73]	2018	✓	✓
[74]	2018	✓	
[75]	2018	✓	✓
[76]	2017	✓	✓
[77]	2017	✓	✓
[78]	2017	✓	✓
[79]	2017	✓	✓
[80]	2017	✓	✓
[81]	2017	✓	✓
[82]	2017	✓	✓
[83]	2017	✓	✓
[84]	2017	✓	✓
[85]	2017	✓	✓
[86]	2017	✓	✓
[87]	2017	✓	✓
[88]	2017	✓	✓

Referensi	Tahun	XK1	XK2	XK3	XK4	XK5
[89]	2017	✓	✓			
[90]	2017	✓		✓		
[91]	2017	✓	✓			
[99]	2016	✓	✓			
[92]	2016	✓		✓		
[94]	2016	✓	✓			
[95]	2016	✓		✓		
[96]	2016	✓	✓			
[97]	2016	✓		✓		
[98]	2016	✓	✓			
[99]	2016	✓	✓			
Referensi	Tahun	x1	x2	x3	x4	x5
[114]	2016	✓	✓			
[100]	2016	✓		✓		
[101]	2016	✓	✓			
[102]	2016	✓		✓		
[103]	2016	✓	✓			
[104]	2015	✓		✓		
[105]	2015	✓	✓			
[106]	2015	✓	✓			
[107]	2015	✓	✓			
[108]	2015	✓	✓			
[109]	2004	✓	✓			

Persentase dari lima variabel yang berpengaruh dalam meta-analisis mengenai faktor-faktor keselamatan dalam proyek konstruksi dapat dilihat pada Tabel 3. Kelima variabel tersebut mencakup manajemen, peralatan, pelatihan, lingkungan, dan keterampilan. Dengan menggunakan data dari 111 artikel jurnal, grafik ini memberikan gambaran tentang kontribusi masing-masing faktor terhadap keselamatan konstruksi. Variabel-variabel ini dipilih karena memiliki peran krusial dalam memastikan lingkungan kerja yang aman dan efektif

Tabel 3. Statistika Deskriptif Meta Analisis Artikel Jurnal

Variabel	Frekuensi	%	Rangking
X1	104	45%	1
X2	69	30%	2
X3	28	12%	3
X4	27	11%	4
X5	5	2%	5
Jumlah	233	100%	-

Manajemen muncul sebagai faktor yang paling dominan dengan kontribusi sebesar 45%, menunjukkan bahwa faktor manajerial seperti kebijakan keselamatan, pengawasan, dan perencanaan memegang peranan penting dalam keselamatan di proyek konstruksi. Peralatan menduduki posisi kedua dengan 30%, yang menunjukkan bahwa pemilihan dan penggunaan alat yang tepat sangat mempengaruhi keselamatan kerja. Pelatihan mencatatkan angka 12%, yang berarti meskipun penting, pelatihan tidak sebanyak manajemen dan peralatan dalam mempengaruhi hasil keselamatan. Lingkungan dan keterampilan masing-masing memperoleh kontribusi 11% dan 2%, menandakan bahwa kondisi fisik lingkungan serta keterampilan pekerja juga memiliki pengaruh, meski lebih kecil dibandingkan variabel lainnya. Pada Tabel 3. Secara keseluruhan, untuk meningkatkan keselamatan dalam industri konstruksi, prioritas perlu diberikan pada aspek manajerial dan penggunaan peralatan yang tepat.

Konteks manajemen dan pelatihan dalam industri konstruksi, seperti Peralatan, Manajemen, dan Pelatihan. Penyusunan kata-kata ini dalam bentuk word cloud menekankan pentingnya 3 konsep utama tersebut dalam memastikan keberhasilan proyek konstruksi. Pengelolaan peralatan yang efektif, pelatihan yang tepat, dan manajemen lingkungan kerja yang baik sangat mempengaruhi keselamatan dan efisiensi operasional di lapangan.



Gambar 8. Word Cloud

“Manajemen” menjadi yang paling dominan, pada Gambar 8. menunjukkan bahwa aspek manajerial berperan penting dalam keselamatan kerja. Kata "Kompetensi," "Pelatihan," dan "Keterampilan" juga sering muncul, menegaskan pentingnya keahlian tenaga kerja dalam mengurangi risiko kecelakaan. Selain itu, kata "Peralatan" dan "Lingkungan" menunjukkan bahwa faktor teknis dan kondisi kerja juga mempengaruhi tingkat keselamatan. Kata-kata seperti "Risiko," "Keselamatan," dan "Konstruksi" menegaskan bahwa penelitian ini berfokus pada risiko kecelakaan di sektor konstruksi berat. Secara keseluruhan pada Gambar 8. word cloud ini menggambarkan bahwa keselamatan kerja dalam konstruksi rekayasa berat sangat dipengaruhi oleh manajemen yang baik, kompetensi tenaga kerja, pelatihan yang memadai, serta kondisi peralatan dan lingkungan kerja.

Pembahasan

Keselamatan kerja dalam konstruksi rekayasa berat merupakan aspek krusial yang mempengaruhi kelancaran dan keberhasilan suatu proyek. Penelitian ini menggunakan pemodelan persamaan struktural (SEM) untuk memberikan wawasan penting untuk mengelola risiko proyek secara efektif. Integrasi SEM menawarkan pendekatan komprehensif untuk memahami kompleksitas yang terlibat dalam manajemen risiko konstruksi [6]. Risiko kecelakaan pada proyek konstruksi skala besar cenderung lebih tinggi dibandingkan jenis konstruksi lainnya, mengingat kompleksitas pekerjaan, penggunaan alat berat, serta faktor lingkungan yang beragam [3]. Dengan demikian, identifikasi dan analisis faktor-faktor risiko keselamatan merupakan langkah krusial dalam upaya pengurangan kecelakaan kerja. Pada bagian ini, akan dibahas berbagai faktor risiko yang berkontribusi terhadap kecelakaan kerja dalam konstruksi rekayasa berat. Analisis dilakukan berdasarkan studi literatur dari berbagai penelitian terdahulu, mencakup aspek teknis, lingkungan [23], serta manajerial yang memengaruhi tingkat keselamatan kerja [1],[20]. Selain itu, pembahasan ini juga mencakup metode dan strategi mitigasi yang dapat diimplementasikan untuk mengurangi risiko dan meningkatkan keselamatan kerja di lokasi. Berdasarkan hasil meta-analisis yang dilakukan variabel yang paling dominan dalam studi keselamatan konstruksi adalah

1. Variabel *manajemen*

Manajemen keselamatan di tempat kerja memiliki pengaruh besar dalam mengurangi kecelakaan dan memastikan perlindungan pekerja. Dengan frekuensi 104 (45%) dapat dilihat pada Tabel 3. Manajemen keselamatan merupakan faktor utama dalam mengurangi kecelakaan konstruksi. Penelitian oleh [1] menunjukkan bahwa pengelolaan yang baik di proyek konstruksi, termasuk kebijakan keselamatan yang jelas dan pengawasan yang ketat, dapat mengurangi tingkat kecelakaan secara signifikan. Penggunaan pendekatan yang berbasis data untuk memantau dan mengevaluasi risiko juga sangat penting, seperti yang diungkapkan dalam studi oleh [2], yang menemukan bahwa penerapan teknologi seperti Building Information Modeling (BIM) dapat meningkatkan kesadaran keselamatan di lapangan. Selain itu, [3] menekankan pentingnya peran manajer dalam memastikan bahwa kebijakan keselamatan diterapkan secara konsisten, yang dapat memperkecil kemungkinan kecelakaan yang disebabkan oleh kelalaian dalam pengelolaan proyek.

2. Variabel *peralatan*

Penggunaan dan pemeliharaan peralatan yang aman sangat berpengaruh pada pencegahan, kecelakaan. Variabel *peralatan* pada urutan kedua dengan frekuensi 69 (30%), dapat dilihat pada Tabel 3. Penggunaan peralatan yang aman dan terstandarisasi sangat mempengaruhi keselamatan kerja di lapangan. Menurut penelitian oleh [4], kecelakaan sering terjadi akibat kegagalan teknis pada peralatan, yang disebabkan oleh pemeliharaan yang tidak rutin dan penggunaan yang tidak sesuai standar. Studi oleh [5] juga menunjukkan bahwa pelatihan operasional yang tepat dapat meningkatkan kesadaran pekerja tentang bahaya yang dapat ditimbulkan oleh peralatan yang rusak atau tidak terawat. Dengan pengawasan yang lebih ketat dan pemeriksaan rutin, sebagaimana dibahas oleh [6], risiko kecelakaan yang disebabkan oleh kegagalan alat berat dapat diminimalkan..

3. Variabel *pelatihan*

Pendidikan dan pelatihan yang diberikan kepada pekerja langsung berhubungan dengan peningkatan pemahaman mereka terhadap bahaya yang ada dan cara untuk menghindarinya. Variabel *pelatihan* urutan ketiga dengan frekuensi 28 (12%), dapat dilihat pada Tabel 3. Pelatihan yang memadai bagi pekerja terkait keselamatan kerja sangat penting untuk mengurangi risiko kecelakaan. Menurut penelitian oleh [7], pekerja yang menerima pelatihan yang efektif lebih mampu mengenali dan menghindari bahaya yang ada di tempat kerja. Studi oleh [8] menambahkan bahwa pelatihan keselamatan yang bersifat praktis, seperti simulasi atau latihan langsung, dapat meningkatkan pemahaman pekerja mengenai prosedur keselamatan. [9] juga menemukan bahwa perusahaan yang menginvestasikan lebih banyak dalam pelatihan keselamatan cenderung memiliki tingkat kecelakaan yang lebih rendah, karena pekerja lebih terlatih dalam menghadapi situasi berisiko.

4. Variabel *lingkungan*

Kondisi lingkungan kerja seperti cuaca, kenyamanan area kerja, serta potensi risiko lingkungan lainnya turut berperan dalam meningkatkan atau mengurangi keselamatan. Variabel *lingkungan* urutan keempat dengan frekuensi 27 (11%), dapat dilihat pada Tabel 3. Penelitian oleh [10] menunjukkan bahwa kondisi cuaca ekstrem dapat meningkatkan risiko kecelakaan kerja, terutama ketika pekerjaan dilakukan di luar ruangan atau dalam kondisi yang tidak aman. Kondisi fisik lingkungan seperti kebisingan yang berlebihan, kualitas udara yang buruk, atau pencahayaan yang tidak memadai juga dapat mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan pekerja, sebagaimana dijelaskan oleh [11]. Penciptaan lingkungan kerja yang aman, seperti yang dijelaskan oleh [12], melibatkan manajemen yang baik terhadap faktor-faktor tersebut untuk memastikan bahwa kondisi kerja tetap dalam batas yang aman bagi pekerja.

5. Variabel *keterampilan*

Keterampilan pekerja juga menjadi faktor penting meskipun dengan bobot yang lebih kecil dibandingkan dengan faktor lainnya. Variabel *keterampilan* urutan kelima dengan frekuensi 5 (2%), dapat dilihat pada Tabel 3. Menurut [13], pekerja yang memiliki keterampilan tinggi dalam mengoperasikan peralatan dan memahami prosedur keselamatan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan operasional. Studi oleh [14] menunjukkan bahwa keterampilan teknis, yang diperoleh melalui pengalaman dan pelatihan, membantu pekerja dalam membuat keputusan yang tepat ketika menghadapi situasi berisiko. Meskipun keterampilan tidak sebesar pengaruh manajemen dan peralatan, seperti yang dijelaskan oleh [15], pengaruh keterampilan pekerja tetap relevan dalam mengurangi kecelakaan kerja.

Secara keseluruhan, hasil dari meta-analisis ini menunjukkan bahwa manajemen keselamatan, penggunaan peralatan yang tepat, dan pelatihan keselamatan pekerja adalah faktor utama dalam pencegahan kecelakaan konstruksi. Lingkungan kerja dan keterampilan pekerja juga berperan penting meskipun memiliki bobot yang lebih kecil. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi lebih dalam hubungan antara faktor-faktor ini dalam pengelolaan keselamatan konstruksi yang lebih efektif.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam penelitian ini, dilakukan tinjauan literatur mengenai identifikasi faktor-faktor risiko keselamatan dalam konstruksi rekayasa berat. Fokus utama penelitian ini adalah untuk memahami variabel-variabel yang mempengaruhi keselamatan pekerja di sektor konstruksi, dengan mengevaluasi berbagai faktor seperti manajemen, peralatan, pelatihan, lingkungan, dan keterampilan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memberikan pemahaman tentang faktor-faktor yang dapat mengurangi atau meningkatkan risiko keselamatan di lokasi konstruksi, berdasarkan berbagai studi dan artikel yang tersedia.

Berdasarkan hasil meta analisis, variabel-variabel yang ditemukan dalam studi ini memiliki ranking sebagai berikut:

1. Manajemen (45%) menduduki peringkat pertama, menunjukkan bahwa faktor manajerial sangat penting dalam pengelolaan keselamatan konstruksi.
2. Peralatan (30%) berada di peringkat kedua, yang menandakan bahwa penggunaan dan pemeliharaan alat-alat konstruksi sangat mempengaruhi tingkat keselamatan.
3. Pelatihan (12%) menduduki posisi ketiga, dengan peran penting dalam meningkatkan pengetahuan dan keterampilan pekerja untuk memitigasi risiko.
4. Lingkungan (11%) berada di peringkat keempat, yang mengindikasikan bahwa faktor eksternal, seperti kondisi cuaca dan kebersihan lokasi konstruksi, juga berpengaruh.
5. Keterampilan (2%) berada di peringkat kelima, meskipun berkontribusi kecil, namun keterampilan pekerja masih relevan dalam mencegah kecelakaan.

Salah satu kelemahan utama dalam penelitian ini adalah ketergantungan pada literatur analisis sudah mencakup aspek yang luas, masih ada potensi faktor lain yang dapat memengaruhi keselamatan konstruksi yang belum teridentifikasi. Dari analisis yang dilakukan, direkomendasikan agar lebih banyak perhatian diberikan kepada manajemen keselamatan dan peralatan. Penerapan manajemen yang efektif, seperti pengawasan yang ketat dan penggunaan teknologi untuk monitoring keselamatan, bisa memperbaiki hasil keselamatan konstruksi. Selain itu, peralatan yang sesuai standar dan diperiksa secara rutin sangat krusial dalam mencegah kecelakaan. Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan untuk menggunakan model faktor keselamatan yang lebih terintegrasi, seperti Structural Equation Modeling (SEM), untuk menganalisis hubungan antara variabel-variabel yang ada, diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih komprehensif dan berbasis data untuk meningkatkan keselamatan kerja di industri konstruksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Program Penelitian Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi, Universitas Pertahanan Nasional Indonesia (Unan RI). Tanpa dukungan dari program penelitian dan lembaga, fakultas dan universitas, penelitian ini tidak akan selesai dengan benar. Penulis juga ingin mengekspresikan peringkat tertinggi untuk arahan dan arahan para dosen dan guru yang telah membimbing saya melalui proses penelitian. Saya bersyukur atas kemungkinan mengembangkan keterampilan akademik dan ilmiah saya di bidang teknik sipil, terutama untuk keamanan yang terkait dengan teknik yang serius. Kami berharap bahwa kontribusi ini untuk pengembangan sains dan praktik di dunia pembangunan akan bermanfaat, terutama untuk meningkatkan keselamatan kerja di industri konstruksi rekayasa berat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Ahmad and F. Mustafa, "Revolutionizing Workplace Hazard Assessment: A Novel Scale for Construction Safety Risk Management," 2025, doi: 10.13140/RG.2.2.10644.41600.
- [2] B. Manzoor, R. Charef, M. F. Antwi-Afari, K. S. Alotaibi, and E. Harirchian, "Revolutionizing Construction Safety: Unveiling the Digital Potential of Building Information Modeling (BIM)," *Buildings*, vol. 15, no. 5, p. 828, Mar. 2025, doi: 10.3390/buildings15050828.
- [3] P. D. Saputra, M. H. Fansuri, A. A. Laksmi, M. Ragil, and M. N. B. Simbolon, "Construction Safety Risk Assessment for Underground Structures in Military Hospital Projects Using Activity-Based Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)," in *The 8th Mechanical Engineering, Science and Technology International Conference*, Basel Switzerland: MDPI, Feb. 2025, p. 33. doi: 10.3390/engproc2025084033.
- [4] M. N. B. Simbolon, P. D. Saputra, and M. Ragil, "Risk Priority Number Measurement for Construction Safety Risks in Upper Structure Projects of Military Airbase Hangars Based on Activity," in *The 8th Mechanical*

- Engineering, Science and Technology International Conference*, Basel Switzerland: MDPI, Feb. 2025, p. 36. doi: 10.3390/engproc2025084036.
- [5] A. Hussain and S. Hussain, "Measuring Safety Climate and Employee Perception: A New Scale for Construction Industry Safety Practices," 2025, doi: 10.13140/RG.2.2.35810.24003.
- [6] E. N. Jackson and T. S. Priya, "Identification and classification of construction-risk factors for Ghanaian construction projects: An integrated study with structural equation modelling," *Heliyon*, vol. 10, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40397.
- [7] X. Ren, K. C. Terwel, M. Yang, and P. H. A. J. M. van Gelder, "Critical Human and Organizational Factors for Structural Safety in the Dutch Construction Industry," *American Journal of Industrial Medicine*, Mar. 2024, doi: 10.1002/ajim.23681.
- [8] N. T. Long and N. H. Giang, "An estimation of the tower crane safety risk factors in the Vietnamese construction industry," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, vol. 18, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.31814/stce.huce2024-18(3)-05.
- [9] X. Zhao, "Research on high-rise building risk identification and safety risk factor analysis," *Theoretical and Natural Science*, vol. 31, no. 1, pp. 313–319, Apr. 2024, doi: 10.54254/2753-8818/31/20240997
- [10] J. Singh *et al.*, "Enhancing Large-Diameter Tunnel Construction Safety with Robust Optimization and Machine Learning Integrated into BIM," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, Oct. 2024, doi: 10.2174/0118741495343680240911053413.
- [11] W. Hartono, S. A. Kristiawan, D. Handayani, and W. Sutopo, "Safety Risk Assessment Model for Bridge Construction," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 11, no. 1, pp. 161–184, Jan. 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-01-010.
- [12] A. Baghdadi, "EVALUATION OF SAFETY MANAGEMENT DURING TUNNELS CONSTRUCTION IN SAUDI ARABIA," *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 11, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.29121/ijetmr.v11.i4.2024.1449.
- [13] N. Jiang, "Application of Deep Foundation Pit Construction Technology in Civil Engineering Construction," *Journal of Architectural Research and Development*, vol. 9, no. 1, 2025, [Online]. Available: <https://ojs.bbwpublisher.com/index.php/JARD>
- [14] W. Xu and J. Zhang, "Risk Analysis and Response Measures for Safety Management in Hydraulic Engineering Supervision," *Engineering Technology Trends*, vol. 2, no. 1, pp. 0–0, 2024, doi: 10.37155/2972-483x-0201-3.
- [15] S. Zhang, B. Yu, R. Li, and Y. Wan, "Research on the Intelligent Construction and Development of Bridge Engineering Safety Management," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202456503013.
- [16] X. Zhao, "Research on high-rise building risk identification and safety risk factor analysis," *Theoretical and Natural Science*, vol. 31, no. 1, pp. 313–319, Apr. 2024, doi: 10.54254/2753-8818/31/20240997.
- [17] D. Almaskati, S. Kermanshachi, and A. Pamidimukkala, "Identification of Safety Hazards in Highway Construction Projects," in *International Conference on Transportation and Development 2024: Pavements and Infrastructure Systems - Selected Papers from the International Conference on Transportation and Development 2024*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2024, pp. 118–129. doi: 10.1061/9780784485538.011.
- [18] Cooper, H., *Research Synthesis and Meta-Analysis: A Step-by-Step Approach*, 5th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2017.
- [19] Schmidt, F. L., & Hunter, J. E., *Methods of Meta-Analysis: Correcting for Variance*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2015.
- [20] M. Namian, A. Albert, and J. Feng, "Effect of Distraction on Hazard Recognition and Safety Risk Perception," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 144, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001459.
- [21] J. Liu, E. Gong, D. Wang, and Y. Teng, "Cloud Model-Based Safety Performance Evaluation of Prefabricated Building Project in China," *Wireless Personal Communications*, vol. 102, no. 4, pp. 3021–3039, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5323-3..
- [22] D. O. Thomas, E. Oluchi Nwaichi, and P. Chinemerem, "Improving safety performance in the Nigerian oil and gas construction industry through human factor engineering," *Open Research Africa*, vol. 7, p. 1, Jan. 2024, doi: 10.12688/openresafrika.14411.1.
- [23] Y. Chen, B. McCabe, and D. Hyatt, "A resilience safety climate model predicting construction safety performance," *Safety Science*, vol. 109, pp. 434–445, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.07.003.

- [24] P. Wang, P. Wu, J. Wang, H. L. Chi, and X. Wang, "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 6. MDPI AG, Jun. 08, 2018. doi: 10.3390/ijerph15061204.
- [25] J. Tan and Y. Li, "Research on Civil Engineering Construction Safety Management Methods by Introducing Bayesian Network Modeling," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.2478/amns-2024-2740.
- [26] J. Singh *et al.*, "Enhancing Large-Diameter Tunnel Construction Safety with Robust Optimization and Machine Learning Integrated into BIM," *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, Oct. 2024, doi: 10.2174/0118741495343680240911053413.
- [27] K. Kim, K. Kim, and S. Jeong, "Application of YOLO v5 and v8 for Recognition of Safety Risk Factors at Construction Sites," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, p. 15179, Oct. 2023, doi: 10.3390/su152015179.
- [28] X. Li, F. Zhang, M. Zhang, and J. Wang, "Comparison of Safety Risk Identification of Bridge and Tunnel Engineering," 2022.
- [29] Y. A. S. Gamal, E. M. A. Allah, M. Maged, and M. Enieb, "Assessment of risk factors causing delays in road construction in Egypt," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1269, no. 1, p. 012007, Nov. 2022, doi: 10.1088/1757-899x/1269/1/012007.
- [30] S. Shakerian *et al.*, "Assessing occupational risk of heat stress at construction: A worker-centric wearable sensor-based approach," *Safety Science*, vol. 142, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105395.
- [31] S. Sadeghi, N. Soltanmohammadlou, and P. Rahnamayiezekavat, "A systematic review of scholarly works addressing crane safety requirements," *Safety Science*, vol. 133, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2020.105002.
- [32] U. Khalid, A. Sagoo, and M. Benachir, "Safety Management System (SMS) framework development – Mitigating the critical safety factors affecting Health and Safety performance in construction projects," *Safety Science*, vol. 143, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105402.
- [33] Z. Qiu, Q. Liu, X. Li, J. Zhang, and Y. Zhang, "Construction and analysis of a coal mine accident causation network based on text mining," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 153, pp. 320–328, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.07.032.
- [34] Z. Liu, X. Meng, Z. Xing, and A. Jiang, "Digital twin-based safety risk coupling of prefabricated building hoisting," *Sensors*, vol. 21, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21113583.
- [35] R. Zhu, X. Hu, J. Hou, and X. Li, "Application of machine learning techniques for predicting the consequences of construction accidents in China," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 145, pp. 293–302, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.08.006.
- [36] S. Stiles, D. Golightly, and B. Ryan, "Impact of COVID-19 on health and safety in the construction sector," *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, vol. 31, no. 4, pp. 425–437, Jul. 2021, doi: 10.1002/hfm.20882.
- [37] L. Hou, H. Chen, G. K. Zhang, and X. Wang, "Deep learning-based applications for safety management in the AEC industry: A review," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–18, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11020821.
- [38] M. N. Maliha, Y. I. Abu Aisheh, B. A. Tayeh, and A. Almalki, "Safety barriers identification, classification, and ways to improve safety performance in the architecture, engineering, and construction (Aec) industry: Review study," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 6. MDPI AG, Mar. 02, 2021. doi: 10.3390/su13063316.
- [39] N. XU, L. MA, Q. Liu, L. WANG, and Y. Deng, "An improved text mining approach to extract safety risk factors from construction accident reports," *Safety Science*, vol. 138, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105216.
- [40] G. H. Zhang, W. Chen, Y. Y. Jiao, H. Wang, and C. T. Wang, "A failure probability evaluation method for collapse of drill-and-blast tunnels based on multistate fuzzy Bayesian network," *Engineering Geology*, vol. 276, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105752.
- [41] C. Nnaji and A. A. Karakhan, "Technologies for safety and health management in construction: Current use, implementation benefits and limitations, and adoption barriers," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, May 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101212.
- [42] C. Lin *et al.*, "A new quantitative method for risk assessment of water inrush in karst tunnels based on variable weight function and improved cloud model," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 95, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.tust.2019.103136.
- [43] A. Ajayi *et al.*, "Deep Learning Models for Health and Safety Risk Prediction in Power Infrastructure Projects," *Risk Analysis*, vol. 40, no. 10, pp. 2019–2039, Oct. 2020, doi: 10.1111/risa.13425.

- [44] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, and Y. Rezgui, "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research," *Automation in Construction*, vol. 114. Elsevier B.V., Jun. 01, 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179.
- [45] T. K. M. Wong, S. S. Man, and A. H. S. Chan, "Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers," *Safety Science*, vol. 126, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104663.
- [46] M. A. Kassem, M. A. Khoiry, and N. Hamzah, "Theoretical review on critical risk factors in oil and gas construction projects in Yemen," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, no. 4. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 934–968, 2020. doi: 10.1108/ECAM-03-2019-0123.
- [47] Y. Y. Zhou *et al.*, "The failure mechanism and construction practice of large underground caverns in steeply dipping layered rock masses," *Engineering Geology*, vol. 250, pp. 45–64, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.01.006.
- [48] Y. Niu *et al.*, "Towards the 'third wave': An SCO-enabled occupational health and safety management system for construction," *Safety Science*, vol. 111, pp. 213–223, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2018.07.013.
- [49] F. Zhang, H. Fleyeh, X. Wang, and M. Lu, "Construction site accident analysis using text mining and natural language processing techniques," *Automation in Construction*, vol. 99, pp. 238–248, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.12.016.
- [50] S. S. Man, A. H. S. Chan, and S. Alabdulkarim, "Quantification of risk perception: Development and validation of the construction worker risk perception (CoWoRP) scale," *Journal of Safety Research*, vol. 71, pp. 25–39, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jsr.2019.09.009.
- [51] B. K. L. Low, S. S. Man, A. H. S. Chan, and S. Alabdulkarim, "Construction worker risk-taking behavior model with individual and organizational factors," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 8, Apr. 2019, doi: 10.3390/ijerph16081335.
- [52] K. Kang and H. Ryu, "Predicting types of occupational accidents at construction sites in Korea using random forest model," *Safety Science*, vol. 120, pp. 226–236, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.06.034.
- [53] C. He, G. Jia, B. McCabe, Y. Chen, and J. Sun, "Impact of psychological capital on construction worker safety behavior: Communication competence as a mediator," *Journal of Safety Research*, vol. 71, pp. 231–241, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jsr.2019.09.007.
- [54] A. Darko, A. P. C. Chan, E. E. Ameyaw, E. K. Owusu, E. Pärn, and D. J. Edwards, "Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction," *International Journal of Construction Management*, vol. 19, no. 5, pp. 436–452, Sep. 2019, doi: 10.1080/15623599.2018.1452098.
- [55] B. Pandit, A. Albert, Y. Patil, and A. J. Al-Bayati, "Impact of safety climate on hazard recognition and safety risk perception," *Safety Science*, vol. 113, pp. 44–53, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2018.11.020.
- [56] H. A. El-khalek, R. F. Aziz, and E. S. Morgan, "Identification of construction subcontractor prequalification evaluation criteria and their impact on project success," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, no. 1, pp. 217–223, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.aej.2018.11.010.
- [57] A. Marefat, H. Toosi, and R. Mahmoudi Hasankhanlo, "A BIM approach for construction safety: applications, barriers and solutions," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 26, no. 9, pp. 1855–1877, Sep. 2019, doi: 10.1108/ECAM-01-2017-0011.
- [58] M. T. Newaz, P. Davis, M. Jefferies, and M. Pillay, "Using a psychological contract of safety to predict safety climate on construction sites," *Journal of Safety Research*, vol. 68, pp. 9–19, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jsr.2018.10.012.
- [59] W. M. Alruqi and M. R. Hallowell, "Critical Success Factors for Construction Safety: Review and Meta-Analysis of Safety Leading Indicators," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, no. 3, Mar. 2019, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001626.
- [60] S. Winge, E. Albrechtsen, and J. Arnesen, "A comparative analysis of safety management and safety performance in twelve construction projects," *Journal of Safety Research*, vol. 71, pp. 139–152, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jsr.2019.09.015.
- [61] R. Jin *et al.*, "A science mapping approach based review of construction safety research," *Safety Science*, vol. 113. Elsevier B.V., pp. 285–297, Mar. 01, 2019. doi: 10.1016/j.ssci.2018.12.006.
- [62] W. Umer, H. Li, W. Lu, G. P. Y. Szeto, and A. Y. L. Wong, "Development of a tool to monitor static balance of construction workers for proactive fall safety management," *Automation in Construction*, vol. 94, pp. 438–448, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.024.
- [63] W. Zhou, T. Zhao, W. Liu, and J. Tang, "Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective," *Safety Science*, vol. 109, pp. 95–108, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.05.001.

- [64] N. S. N. Yiu, N. N. Sze, and D. W. M. Chan, "Implementation of safety management systems in Hong Kong construction industry – A safety practitioner's perspective," *Journal of Safety Research*, vol. 64, pp. 1–9, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jsr.2017.12.011.
- [65] P. Liu, Q. Li, J. Bian, L. Song, and X. Xiahou, "Using interpretative structural modeling to identify critical success factors for safety management in subway construction: A China study," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.3390/ijerph15071359.
- [66] X. Li, W. Yi, H. L. Chi, X. Wang, and A. P. C. Chan, "A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety," *Automation in Construction*, vol. 86, pp. 150–162, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2017.11.003.
- [67] T. Foster, J. Willetts, M. Lane, P. Thomson, J. Katuva, and R. Hope, "Risk factors associated with rural water supply failure: A 30-year retrospective study of handpumps on the south coast of Kenya," *Science of the Total Environment*, vol. 626, pp. 156–164, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.302.
- [68] M. Gunduz and B. Ahsan, "Construction safety factors assessment through Frequency Adjusted Importance Index," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 64, pp. 155–162, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ergon.2018.01.007.
- [69] H. Hong, P. Tsangaratos, I. Ilia, J. Liu, A. X. Zhu, and W. Chen, "Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China," *Science of the Total Environment*, vol. 625, pp. 575–588, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.256.
- [70] L. P. Andersen, L. Nørddam, T. Joensson, P. Kines, and K. J. Nielsen, "Social identity, safety climate and self-reported accidents among construction workers," *Construction Management and Economics*, vol. 36, no. 1, pp. 22–31, Jan. 2018, doi: 10.1080/01446193.2017.1339360.
- [71] A. Bavafa, A. Mahdiyar, and A. K. Marsono, "Identifying and assessing the critical factors for effective implementation of safety programs in construction projects," *Safety Science*, vol. 106, pp. 47–56, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.02.025.
- [72] K. A. Alomari, J. A. Gambatese, and N. Tymvios, "Risk Perception Comparison among Construction Safety Professionals: Delphi Perspective," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 144, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001565.
- [73] A. Akhtar and A. K. Sarmah, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 262–281, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085.
- [74] Madhav Prasad Koirala, "Risk Factors in Construction Infrastructures Projects and Safety Engineering Practiced in Nepal," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V7, no. 09, Sep. 2018, doi: 10.17577/IJERTV7IS090066.
- [75] W. Liu, T. Zhao, W. Zhou, and J. Tang, "Safety risk factors of metro tunnel construction in China: An integrated study with EFA and SEM," *Safety Science*, vol. 105, pp. 98–113, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.01.009.
- [76] L. Zhang, L. Ding, X. Wu, and M. J. Skibniewski, "An improved Dempster–Shafer approach to construction safety risk perception," *Knowledge-Based Systems*, vol. 132, pp. 30–46, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.knosys.2017.06.014.
- [77] Y. Zhou, W. Su, L. Ding, H. Luo, and P. E. D. Love, "Predicting Safety Risks in Deep Foundation Pits in Subway Infrastructure Projects: Support Vector Machine Approach," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 31, no. 5, Sep. 2017, doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000700.
- [78] Y. Zou, A. Kiviniemi, and S. W. Jones, "A review of risk management through BIM and BIM-related technologies," *Safety Science*, vol. 97, pp. 88–98, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2015.12.027.
- [79] S. C. Li, J. Wu, Z. H. Xu, and L. P. Li, "Unascertained measure model of water and mud inrush risk evaluation in karst tunnels and its engineering application," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 1170–1182, May 2017, doi: 10.1007/s12205-016-1569-z.
- [80] C. Wu, N. Li, and D. Fang, "Leadership improvement and its impact on workplace safety in construction projects: A conceptual model and action research," *International Journal of Project Management*, vol. 35, no. 8, pp. 1495–1511, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijproman.2017.08.013.
- [81] S. Seker and E. K. Zavadskas, "Application of fuzzy DEMATEL method for analyzing occupational risks on construction sites," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 11, Nov. 2017, doi: 10.3390/su9112083.
- [82] M. Shan, B. gang Hwang, and K. S. N. Wong, "A preliminary investigation of underground residential buildings: Advantages, disadvantages, and critical risks," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 70, pp. 19–29, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.tust.2017.07.004.

- [83] I. Mohammadfam, F. Ghasemi, O. Kalatpour, and A. Moghimbeigi, "Constructing a Bayesian network model for improving safety behavior of employees at workplaces," *Applied Ergonomics*, vol. 58, pp. 35–47, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.05.006.
- [84] M. Mazlina Zaira and B. H. W. Hadikusumo, "Structural equation model of integrated safety intervention practices affecting the safety behaviour of workers in the construction industry," *Safety Science*, vol. 98, pp. 124–135, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2017.06.007.
- [85] H. Lingard, M. Hallowell, R. Salas, and P. Pirzadeh, "Leading or lagging? Temporal analysis of safety indicators on a large infrastructure construction project," *Safety Science*, vol. 91, pp. 206–220, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.08.020.
- [86] M. Kassem, L. Benomran, and J. Teizer, "Virtual environments for safety learning in construction and engineering: seeking evidence and identifying gaps for future research," *Visualization in Engineering*, vol. 5, no. 1. Springer, Dec. 01, 2017. doi: 10.1186/s40327-017-0054-1.
- [87] A. Aryal, A. Ghahramani, and B. Becerik-Gerber, "Monitoring fatigue in construction workers using physiological measurements," *Automation in Construction*, vol. 82, pp. 154–165, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.03.003.
- [88] S. Demirkenen and B. Ozorhon, "Measuring Project Management Performance: Case of Construction Industry," *EMJ - Engineering Management Journal*, vol. 29, no. 4, pp. 258–277, Oct. 2017, doi: 10.1080/10429247.2017.1380579.
- [89] B. Choi, S. Ahn, and S. Lee, "Construction Workers' Group Norms and Personal Standards Regarding Safety Behavior: Social Identity Theory Perspective," *Journal of Management in Engineering*, vol. 33, no. 4, Jul. 2017, doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000511.
- [90] Y. Chen, B. McCabe, and D. Hyatt, "Impact of individual resilience and safety climate on safety performance and psychological stress of construction workers: A case study of the Ontario construction industry," *Journal of Safety Research*, vol. 61, pp. 167–176, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jsr.2017.02.014.
- [91] J. Ajslev *et al.*, "Safety climate and accidents at work: Cross-sectional study among 15,000 workers of the general working population," *Safety Science*, vol. 91, pp. 320–325, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.08.029.
- [92] L. Zhang, X. Wu, L. Ding, M. J. Skibniewski, and Y. Lu, "Bim-Based Risk Identification System in tunnel construction," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 22, no. 4, pp. 529–539, May 2016, doi: 10.3846/13923730.2015.1023348.
- [93] G. H. Zhang, Y. Y. Jiao, L. B. Chen, H. Wang, and S. C. Li, "Analytical model for assessing collapse risk during mountain tunnel construction," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 53, no. 2, pp. 326–342, Feb. 2016, doi: 10.1139/cgj-2015-0064.
- [94] W. Umer, ; Heng Li, G. Pui, Y. Szeto, A. Yu, and L. Wong, "Identification of Biomechanical Risk Factors for the Development of Lower-Back Disorders during Manual Rebar Tying," 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943.
- [95] L. Wang and H. Ge, "Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies: A stochastic approach," *Building and Environment*, vol. 97, pp. 11–25, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.11.034.
- [96] J. Wang, P. X. W. Zou, and P. P. Li, "Critical factors and paths influencing construction workers' safety risk tolerances," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 93, pp. 267–279, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.aap.2015.11.027.
- [97] D. A. Patel and K. N. Jha, "Structural Equation Modeling for Relationship-Based Determinants of Safety Performance in Construction Projects," *Journal of Management in Engineering*, vol. 32, no. 6, Nov. 2016, doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000457.
- [98] L. D. Nguyen, D. Q. Tran, and M. P. Chandrawinata, "Predicting Safety Risk of Working at Heights Using Bayesian Networks," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, no. 9, Sep. 2016, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001154.
- [99] H. Malekitabar, A. Ardeshir, M. H. Sebt, and R. Stouffs, "Construction safety risk drivers: A BIM approach," *Safety Science*, vol. 82, pp. 445–455, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2015.11.002.
- [100] I. Chang, J. Im, and G. C. Cho, "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, no. 3. MDPI, Mar. 10, 2016. doi: 10.3390/su8030251.
- [101] B. Jitwasinkul, B. H. W. Hadikusumo, and A. Q. Memon, "A Bayesian Belief Network model of organizational factors for improving safe work behaviors in Thai construction industry," *Safety Science*, vol. 82, pp. 264–273, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2015.09.027.
- [102] G. Bernardini, M. D'Orazio, and E. Quagliarini, "Towards a 'behavioural design' approach for seismic risk reduction strategies of buildings and their environment," *Safety Science*, vol. 86, pp. 273–294, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.010.

- [103] L. Zhang, X. Wu, L. Ding, M. J. Skibniewski, and Y. Lu, "Bim-Based Risk Identification System in tunnel construction," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 22, no. 4, pp. 529–539, May 2016, doi: 10.3846/13923730.2015.1023348.
- [104] Z. Zhou, Y. M. Goh, and Q. Li, "Overview and analysis of safety management studies in the construction industry," *Safety Science*, vol. 72. Elsevier B.V., pp. 337–350, Feb. 01, 2015. doi: 10.1016/j.ssci.2014.10.006.
- [105] R. P. Zhang, H. Lingard, and S. Nevin, "Development and validation of a multilevel safety climate measurement tool in the construction industry," *Construction Management and Economics*, vol. 33, no. 10, pp. 818–839, Oct. 2015, doi: 10.1080/01446193.2015.1108451.
- [106] S. Rowlinson and Y. A. Jia, "Construction accident causality: An institutional analysis of heat illness incidents on site," *Safety Science*, vol. 78, pp. 179–189, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.021.
- [107] B. H. W. Guo, T. W. Yiu, and V. A. González, "Identifying behaviour patterns of construction safety using system archetypes," *Accident Analysis and Prevention*, vol. 80, pp. 125–141, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.aap.2015.04.008.
- [108] M. Giardina and M. Morale, "Safety study of an LNG regasification plant using an FMECA and HAZOP integrated methodology," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 35, pp. 35–45, May 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2015.03.013.
- [109] A. G. Benardos and D. C. Kaliampakos, "A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunnelling - Illustrated by the Athens Metro, Greece," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, no. 6, pp. 987–999, 2004, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.007.
- [110] M. Hu *et al.*, "Responsible AI in Construction Safety: Systematic Evaluation of Large Language Models and Prompt Engineering." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/387317811>
- [111] B. John and J. Olusegun, "Integrating Smart Robotics Systems for Enhanced Efficiency and Safety in Construction: Engineering Innovations Shaping the Future of the Industry." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/386507737>
- [112] Y.-X. Liu, "Application of Safety Management Models in Civil Engineering Construction." [Online]. Available: www.omniscient.sg
- [113] X.-Y. Zang and J. Province, "The Construction and Operation of Safety Production Systems in Hydraulic Engineering." [Online]. Available: www.omniscient.sg
- [114] L. Y. Ding, B. T. Zhong, S. Wu, and H. B. Luo, "Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology," *Safety Science*, vol. 87, pp. 202–213, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2016.04.008.