

Pemanfaatan *Virtual Reality* untuk Evaluasi Faktor Lingkungan Kerja terhadap Pekerja Konstruksi: Tinjauan Literatur Sistematis

Ivo Vincenes Sibarani*, Titis Wijayanto

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

e-mail: *ivovincenessibarani@mail.ugm.ac.id, twijaya@ugm.ac.id

(artikel diterima: 06-07-2026, artikel disetujui: 13-07-2026)

Abstrak

Industri konstruksi menghadapi risiko keselamatan kerja yang tinggi akibat paparan simultan terhadap faktor lingkungan seperti suhu panas, ketinggian, kebisingan, getaran, dan pencahayaan yang tidak memadai. Evaluasi faktor-faktor tersebut pada kondisi nyata sering terkendala risiko keselamatan dan keterbatasan kontrol eksperimen, sehingga Virtual Reality (VR) berkembang sebagai alternatif simulasi yang aman dan terkontrol. Tinjauan literatur sistematis ini bertujuan mensintesis penelitian mengenai pemanfaatan VR dalam mengevaluasi faktor lingkungan kerja konstruksi. Menggunakan metode PRISMA, sebanyak 903 rekaman dari tiga basis data (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore) disaring hingga diperoleh 16 artikel yang memenuhi kriteria pada periode 2011–2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa faktor ketinggian paling banyak diteliti dan secara konsisten menurunkan stabilitas postural serta meningkatkan kelelahan mental dan kecemasan pekerja, sedangkan paparan panas terbukti mengganggu fungsi kognitif dan keseimbangan tubuh secara bersamaan. Faktor kebisingan, pencahayaan, dan getaran masing-masing baru dikaji secara tunggal, sementara tiga studi yang mengombinasikan beberapa faktor menunjukkan bahwa dampak paparan multifaktor cenderung lebih besar dibandingkan dengan paparan tunggal. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa penelitian mendatang perlu memperluas kajian pada faktor lingkungan yang masih minim diteliti, mengembangkan skenario VR multifaktor, serta menyusun model evaluasi risiko yang terintegrasi. Arah penelitian tersebut penting untuk menghasilkan basis bukti ilmiah yang lebih representatif terhadap kondisi kerja nyata, sehingga dapat mendukung perancangan strategi keselamatan dan kesehatan kerja yang lebih efektif guna menekan tingginya angka kecelakaan fatal di sektor konstruksi.

Kata kunci: keselamatan konstruksi, lingkungan kerja, tinjauan literatur sistematis, virtual reality

Abstract

The construction industry faces substantial occupational safety risks due to simultaneous exposure to environmental factors such as extreme temperature, height, noise, vibration, and inadequate lighting. Evaluating these factors under real working conditions is often constrained by safety concerns and limited experimental control, which positions Virtual Reality (VR) as a safe and controllable simulation alternative. This systematic literature review aims to synthesize research on the use of VR to evaluate environmental factors in construction work settings. Following the PRISMA framework, 903 records were retrieved from three databases (Scopus, ScienceDirect, and IEEE Xplore) and screened down to 16 eligible studies published between 2011 and 2025. The findings indicate that height exposure has received the most research attention and consistently impairs postural stability while increasing workers' mental fatigue and anxiety, whereas heat exposure has been shown to simultaneously impair cognitive function and body balance. Noise, lighting, and vibration have each been examined only as single factors, while three studies combining multiple factors indicate that the effects of multi-factor exposure tend to be greater than those of single-factor exposure. This review concludes that future research needs to expand investigation into

DOI: <https://doi.org/10.31001/tekinfo.v15i1.3025>

E-ISSN: 2303-1867 | P-ISSN: 2303-1476

under-studied environmental factors, develop multi-factor VR scenarios, and establish integrated risk-evaluation models. This research direction is essential for producing a more representative scientific evidence base of real working conditions, thereby supporting the design of more effective occupational safety and health strategies to reduce the construction sector's high rate of fatal accidents.

Keywords: *construction safety, systematic literature review, virtual reality, work environment*

1. PENDAHULUAN

Sektor konstruksi memiliki peran penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi global, dengan nilai pekerjaan konstruksi diproyeksikan meningkat dari US\$9,7 triliun pada 2022 menjadi US\$13,9 triliun pada 2037 (Oxford Economics, 2023). Namun, sektor ini juga mencatat tingkat kecelakaan kerja fatal tertinggi dibandingkan dengan sektor lainnya. Data dari negara-negara Uni Eropa menunjukkan bahwa hampir seperempat (24,0%) dari seluruh kecelakaan kerja fatal pada tahun 2023 terjadi di sektor konstruksi (Eurostat, 2024).

Salah satu faktor risiko yang kerap dihadapi pekerja konstruksi adalah bekerja di ketinggian. Sektor konstruksi menyumbang 47,8% dari seluruh kecelakaan jatuh fatal yang tercatat di seluruh sektor industri pada tahun 2023 (Bureau of Labor Statistics, 2025). Paparan ketinggian tidak hanya menimbulkan bahaya fisik secara langsung, tetapi terbukti dapat memicu kelelahan mental, kecemasan, penurunan perhatian, penurunan akurasi tugas, dan gangguan koordinasi motorik halus (Habibnezhad et al., 2020; Z. Li et al., 2024; Tehrani et al., 2022). Selain itu, bekerja di ketinggian terbukti meningkatkan aktivitas sistem saraf simpatis yang tercermin dari peningkatan denyut jantung (Arachchige et al., 2023), serta mengganggu keseimbangan postural melalui mekanisme persepsi visual dan rasa takut, yang pada akhirnya meningkatkan risiko jatuh (Chander et al., 2021; Habibnezhad et al., 2020).

Selain faktor ketinggian, paparan panas akibat aktivitas kerja di lingkungan bersuhu tinggi juga merupakan faktor risiko yang umum ditemukan. Paparan panas tercatat menyebabkan 436 kematian di berbagai sektor industri, termasuk sektor konstruksi, sepanjang tahun 2011 hingga 2021 (Bureau of Labor Statistics, 2023). Kondisi ini terbukti meningkatkan suhu tubuh dan denyut jantung (Tan et al., 2025), sekaligus memperburuk kelelahan mental dan menurunkan kontrol perhatian (Ouyang & Luo, 2025; Shin et al., 2024). Selain itu, paparan panas juga mengganggu keseimbangan postural sehingga memperbesar risiko terjatuh (Tan et al., 2025).

Faktor risiko lainnya yang juga sering dijumpai di lingkungan kerja konstruksi meliputi kebisingan, pencahayaan yang tidak memadai, dan getaran mekanis. Paparan kebisingan terbukti menurunkan produktivitas kerja, meningkatkan beban kognitif, serta mengganggu proses identifikasi bahaya (Guo et al., 2025; Hong et al., 2023; Ouyang et al., 2025). Pencahayaan yang tidak memadai meningkatkan kelelahan visual dan menurunkan kinerja visual pekerja (Li et al., 2024), sedangkan paparan getaran menyebabkan penurunan stabilitas postural yang berpotensi meningkatkan risiko jatuh (Hong et al., 2024; Simeonov et al., 2011).

Untuk memahami dampak berbagai faktor risiko tersebut secara ilmiah, diperlukan pendekatan penelitian yang mampu mereplikasi kondisi lapangan secara aman dan terkendali. Penelitian berbasis kondisi nyata sering kali menghadapi kendala, terutama terkait risiko keselamatan partisipan dan sulitnya mengendalikan variabel penelitian secara konsisten. Teknologi *Virtual Reality* (VR) menawarkan alternatif yang menjanjikan karena mampu menghadirkan simulasi lingkungan kerja yang realistis, aman, dan dapat direplikasi (Ke et al., 2019). Melalui pendekatan ini,

peneliti dapat mengendalikan berbagai variabel secara sistematis sekaligus mengevaluasi pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap pekerja tanpa menempatkan partisipan pada bahaya nyata (Arachchige et al., 2023; Habibnezhad et al., 2020; Shin et al., 2024).

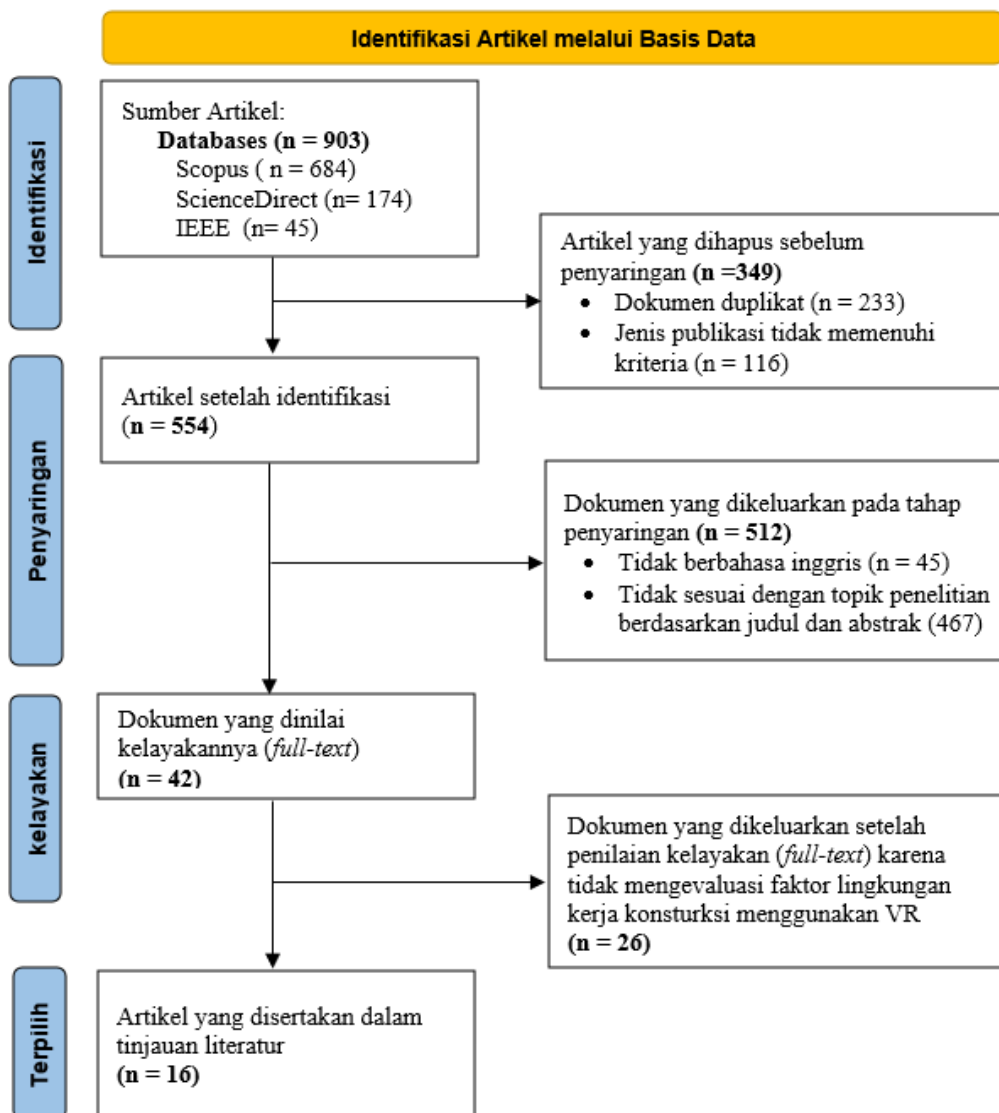
Meskipun pemanfaatan VR dalam penelitian ergonomi konstruksi terus berkembang, sebagian besar studi masih mengevaluasi setiap faktor lingkungan secara terpisah. Penelitian mengenai ketinggian umumnya berfokus pada stabilitas postural dan respons psikofisiologis (Chander et al., 2021; Habibnezhad et al., 2020; Kisker et al., 2021; Peterson et al., 2018), sedangkan penelitian mengenai panas dan kebisingan lebih banyak menyoroti penurunan perhatian dan produktivitas kerja (Hong et al., 2023; Ouyang et al., 2025; Shin et al., 2024). Padahal, dalam kondisi kerja yang sebenarnya, pekerja sering kali terpapar lebih dari satu faktor risiko secara bersamaan. Kesenjangan tersebut berpotensi menghasilkan evaluasi risiko yang kurang komprehensif serta strategi mitigasi yang belum sepenuhnya mencerminkan kondisi di lapangan.

Di sisi lain, tinjauan literatur sebelumnya mengenai pemanfaatan VR di sektor konstruksi umumnya berfokus pada penerapan dan efektivitasnya dalam keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Akindele et al. (2024) memetakan aplikasi VR dalam K3 konstruksi, Babalola et al. (2023) mengulas pemanfaatan teknologi *immersive* untuk manajemen K3, sedangkan Man et al. (2024) mengevaluasi efektivitas VR sebagai media pelatihan keselamatan. Namun, tinjauan-tinjauan tersebut belum secara khusus menyoroti bagaimana VR dimanfaatkan sebagai instrumen untuk mengevaluasi pengaruh faktor lingkungan kerja konstruksi terhadap pekerja. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi, mengelompokkan, dan mensintesis penelitian mengenai pemanfaatan VR dalam mengevaluasi berbagai faktor lingkungan kerja konstruksi guna memetakan tren penelitian, mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan, termasuk sejauh mana kombinasi faktor lingkungan telah dikaji secara simultan, serta memberikan rekomendasi arah penelitian selanjutnya untuk mendukung perancangan lingkungan kerja konstruksi yang lebih aman, sehat, dan produktif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Dokumen yang berkaitan dengan pemanfaatan *Virtual Reality* (VR) untuk mengevaluasi dampak faktor lingkungan kerja konstruksi diperoleh melalui pencarian pada basis data Scopus, ScienceDirect, dan IEEE Xplore. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci "*virtual reality*" dan "*construction*" yang dipadukan dengan kata kunci yang merepresentasikan faktor lingkungan kerja, yang meliputi "*heat*", "*height*", "*vibration*", "*noise*", "*dust*", dan "*lighting*", beserta sinonim dari masing-masing kata kunci. Pencarian dilakukan pada judul, abstrak, dan kata kunci dokumen dengan rentang tahun publikasi 2011 hingga 2025.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi dokumen yang dipublikasikan dalam bahasa Inggris, menggunakan teknologi VR sebagai metode simulasi, serta mengevaluasi pengaruh faktor lingkungan kerja konstruksi. Kriteria eksklusi meliputi dokumen yang berupa *literature review*, laporan, *letter*, editorial, atau jenis publikasi lain yang bukan merupakan penelitian asli (*original research*) ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1 Identifikasi Dokumen

Proses seleksi dokumen dilakukan dalam tiga tahapan. Tahap pertama adalah identifikasi dokumen yang diperoleh dari setiap basis data, dilanjutkan dengan penghapusan dokumen duplikat dan dokumen dengan jenis publikasi yang tidak sesuai kriteria. Tahap kedua adalah penyaringan berdasarkan bahasa, judul, dan abstrak untuk menyeleksi dokumen yang sesuai dengan topik dan tujuan penelitian. Tahap ketiga adalah penilaian kelayakan melalui penelaahan teks lengkap terhadap dokumen yang lolos tahap penyaringan untuk memastikan kesesuaiannya dengan seluruh kriteria inklusi dan eksklusi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Identifikasi dan Seleksi Artikel

Proses seleksi dokumen mengikuti alur PRISMA sebagaimana disajikan pada Gambar 1. Pada tahap identifikasi, penelusuran pada tiga basis data menghasilkan 903 artikel yang terdiri atas 684 artikel dari Scopus, 174 artikel dari ScienceDirect, dan 45 artikel dari IEEE Xplore. Sebelum tahap penyaringan, sebanyak 349 artikel dihapus, terdiri atas 233 artikel duplikat dan 116 artikel dengan jenis publikasi yang tidak sesuai

kriteria, sehingga tersisa 554 artikel untuk disaring. Tahap penyaringan berdasarkan bahasa, judul, dan abstrak mengeksklusi 512 artikel, yaitu 45 artikel yang tidak berbahasa Inggris dan 467 artikel yang tidak sesuai dengan topik penelitian, sehingga diperoleh 42 artikel yang dinilai kelayakannya melalui penelaahan teks lengkap (*full-text*). Pada tahap ini, 26 artikel dieksklusi karena tidak mengevaluasi faktor lingkungan kerja konstruksi menggunakan VR. Melalui keseluruhan proses seleksi tersebut, diperoleh 16 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan eksklusi untuk dianalisis lebih lanjut dalam tinjauan literatur ini.

Tabel 1 merangkum 16 artikel yang dianalisis dalam tinjauan literatur ini, meliputi penulis, faktor lingkungan yang dievaluasi, teknologi VR yang digunakan, dan temuan utama masing-masing studi.

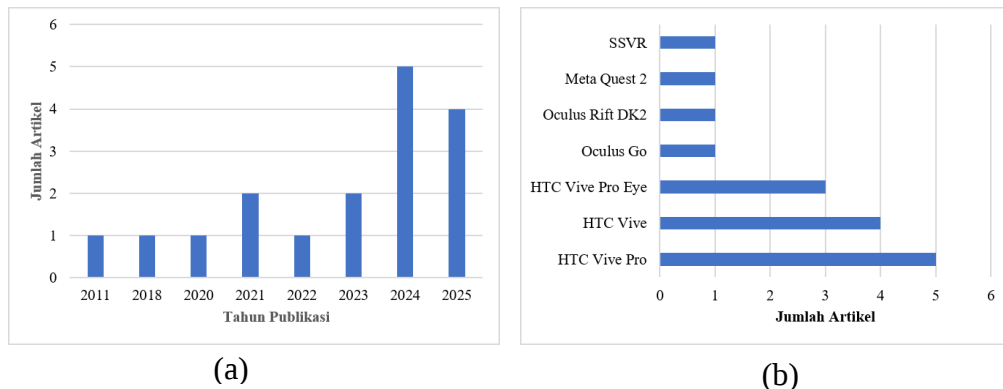
Tabel 1 Rekapitulasi Artikel

No	Penulis	Faktor	Teknologi VR	Temuan Utama
1	Duorinaah et al. (2025)	Ketinggian	HTC Vive Pro Eye	Paparan ketinggian virtual pada perancah 6 meter dan atap 21 meter meningkatkan risiko jatuh dari ketinggian, yang ditunjukkan oleh perubahan respons fisiologis.
2	Li et al. (2024)	Ketinggian	HTC Vive	Paparan pada perancah dan puncak crane meningkatkan ketakutan terhadap ketinggian, gangguan perhatian, dan kelelahan mental, serta memungkinkan deteksi kondisi psikologis yang tidak aman.
3	Arachchige et al. (2023)	Ketinggian	Oculus Go	Paparan ketinggian virtual enam lantai menurunkan kemampuan identifikasi bahaya pada paparan awal, sedangkan paparan berulang meningkatkan kemampuan tersebut sekaligus menurunkan respons kecemasan.
4	Tehrani et al. (2022)	Ketinggian	HTC Vive Pro	Paparan bekerja pada ketinggian virtual 20 meter meningkatkan kelelahan mental.
5	Chander et al. (2021)	Ketinggian	HTC Vive Pro	Paparan ketinggian virtual 40 kaki meningkatkan ayunan pusat tekanan tubuh (<i>Center of Pressure</i>) sehingga menurunkan keseimbangan postural.
6	Kisker et al. (2021)	Ketinggian	HTC Vive Pro	Paparan pada gedung bertingkat meningkatkan ketakutan terhadap ketinggian, respons psikofisiologis, dan rasa kehadiran (<i>presence</i>), serta memperlambat kecepatan berjalan.
7	Habibnezhad et al. (2020)	Ketinggian	HTC Vive	Paparan pada lantai 20 memengaruhi performa tugas, meningkatkan akurasi tugas pelacakan, serta menurunkan keseimbangan postural selama bekerja pada ketinggian virtual.
8	Peterson et al. (2018)	Ketinggian	Oculus Rift DK2	Paparan ketinggian virtual 15 meter selama tugas berjalan di atas balok meningkatkan stres fisiologis dan beban kognitif.
9	Tan et al. (2025)	Panas	Meta Quest 2	Paparan panas (35°C; RH 70%; WBGT 30°C) setelah aktivitas fisik menurunkan keseimbangan postural yang ditunjukkan oleh peningkatan ayunan postural.
10	Shin et al. (2024)	Panas	HTC Vive Pro	Paparan panas (36°C; RH 70%; WBGT 32°C) menurunkan kontrol perhatian serta meningkatkan kelelahan mental.

No	Penulis	Faktor	Teknologi VR	Temuan Utama
11	Hong et al. (2023)	Kebisingan	HTC Vive Pro	Paparan kebisingan konstruksi ≥ 70 dBA menurunkan produktivitas kerja, dengan penurunan terbesar terjadi pada tingkat kebisingan 100 dBA.
12	Simeonov et al. (2011)	Getaran	Surround-Screen Virtual Reality (SSVR)	Paparan getaran tipe <i>supra-sensory</i> meningkatkan ketidakstabilan postur, sehingga meningkatkan risiko jatuh pada pekerjaan di ketinggian.
13	Li et al. (2024)	Pencahayaan	HTC Vive Pro Eye	Paparan pencahayaan < 100 lux meningkatkan kelelahan akibat pencahayaan (<i>illumination fatigue</i>), sedangkan pencahayaan 100–150 lux menurunkan kelelahan tersebut dan meningkatkan kinerja visual.
14	Guo et al. (2025)	Pencahayaan dan Kebisingan	HTC Vive	Paparan pencahayaan 150 lux dan kebisingan 85 dB meningkatkan beban kognitif, terutama pada tugas dengan tingkat kesulitan yang tinggi.
15	Ouyang & Luo (2025)	Panas dan Kebisingan	HTC Vive Pro Eye	Paparan panas (33°C; RH 70%; WBGT 29,6°C) dan kebisingan (≥ 85 dBA) mengganggu alokasi perhatian, sehingga menurunkan akurasi identifikasi bahaya.
16	Hong et al. (2024)	Kebisingan, getaran, dan debu	HTC Vive Pro	Paparan kebisingan 90 dBA, getaran 1900 impacts/min, dan debu secara simultan meningkatkan beban kerja mental serta menurunkan performa kerja, dengan dampak terbesar terjadi pada paparan gabungan ketiga faktor tersebut.

3.2 Tren Publikasi dan Teknologi Virtual Reality

Berdasarkan hasil *literature review*, diperoleh 16 artikel yang memenuhi kriteria, dengan sepuluh (62,5%) di antaranya terbit pada periode 2021–2025. Distribusi publikasi tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan VR untuk mengevaluasi pengaruh faktor lingkungan kerja pada sektor konstruksi merupakan bidang penelitian yang mengalami peningkatan dalam lima tahun terakhir (Gambar 2a). Dari sisi teknologi, perangkat berbasis *Head-Mounted Display* (HMD) mendominasi seluruh studi yang direview (Gambar 2b). HTC Vive dan variannya digunakan pada 12 dari 16 studi (75,0%), sehingga menjadi platform VR yang paling banyak diadopsi dalam penelitian ergonomi konstruksi. Beberapa penelitian yang berfokus pada pencahayaan dan beban kognitif memanfaatkan HTC Vive Pro Eye yang dilengkapi teknologi *eye-tracking* untuk memperoleh data perilaku visual secara lebih akurat (Duorinaah et al., 2025; Li et al., 2024; Ouyang et al., 2025). Sebaliknya, hanya Simeonov et al., (2011) yang menggunakan *sistem surround-screen* VR, yang menunjukkan bahwa teknologi simulasi pada penelitian terdahulu masih didominasi oleh sistem proyeksi berskala besar. Perbedaan tersebut mencerminkan pergeseran perkembangan teknologi VR dari sistem proyeksi berskala besar menuju perangkat HMD yang lebih portabel, imersif, dan mudah diimplementasikan.



Gambar 2 Distribusi artikel berdasarkan (a) tahun publikasi dan (b) teknologi VR.

3.3 Analisis Berdasarkan Faktor Lingkungan

Delapan studi yang mengevaluasi faktor ketinggian secara konsisten menunjukkan bahwa paparan ketinggian virtual mempengaruhi kondisi psikologis, fisiologis, dan postural pekerja secara bersamaan. Pada aspek psikologis, ketinggian ketinggian virtual meningkatkan rasa takut dan kecemasan (Kisker et al., 2021), kelelahan mental (Tehrani et al., 2022), serta distraksi yang dapat menurunkan akurasi tugas (Li et al., 2024). Pola serupa tampak pada aspek fisiologis, ketinggian virtual meningkatkan aktivitas sistem saraf simpatis dan stres fisiologis (Arachchige et al., 2023; Peterson et al., 2018), sejalan dengan temuan Duorinaah et al. (2025) yang menunjukkan bahwa perubahan respons fisiologis pekerja pada ketinggian virtual dapat digunakan untuk mendeteksi peningkatan risiko jatuh secara dini. Pada aspek postural, ketinggian virtual secara berulang terbukti mengganggu stabilitas tubuh melalui peningkatan ayunan pusat tekanan tubuh (Chander et al., 2021) dan penurunan kecepatan berjalan (Habibnezhad et al., 2020; Kisker et al., 2021). Kesesuaian arah temuan pada ketiga aspek tersebut memperkuat bukti bahwa ketinggian merupakan faktor lingkungan yang berdampak luas terhadap fungsi pekerja, tidak hanya pada aspek fisik tetapi juga pada aspek kognitif dan emosional. Menariknya, Arachchige et al. (2023) menunjukkan bahwa paparan berulang terhadap ketinggian virtual yang sama justru memperbaiki kemampuan identifikasi bahaya dan menurunkan respons kecemasan. Perbedaan ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh desain paparan yang digunakan, mengingat sebagian besar studi menguji dampak dari paparan tunggal sedangkan Arachchige et al. (2023) secara khusus mengevaluasi efek dari paparan berulang. Variasi tingkat ketinggian yang disimulasikan serta jenis perangkat VR yang digunakan pada masing-masing studi turut diduga berkontribusi terhadap perbedaan intensitas respons yang dilaporkan antar studi. Pola ini mengindikasikan adanya potensi efek adaptasi pada paparan berulang, yang membuka peluang pemanfaatan VR tidak hanya sebagai alat evaluasi risiko tetapi juga sebagai media pelatihan keselamatan berbasis ketinggian, sekalipun risiko fisik yang mendasarinya tetap perlu diperhatikan.

Dua studi mengenai paparan panas oleh Tan et al. (2025) dan Shin et al., (2024) menunjukkan pola temuan yang saling melengkapi. Tan et al. (2025) berfokus pada dampak fisik, yaitu penurunan keseimbangan postural setelah aktivitas fisik dalam kondisi panas, sementara, Shin et al. (2024) berfokus pada dampak kognitif melalui penurunan kontrol atensi dan peningkatan kelelahan mental yang diukur menggunakan *electroencephalography*. Kedua studi menggunakan kondisi suhu yang relatif sebanding, sehingga temuan keduanya secara bersama-sama menegaskan bahwa paparan panas memengaruhi aspek fisik dan kognitif pekerja konstruksi secara

simultan, bukan hanya salah satu aspek saja. Kesamaan pola pada kedua studi ini memberikan implikasi praktis bagi penjadwalan kerja di lingkungan panas, yaitu pentingnya periode istirahat yang mempertimbangkan pemulihan fisik sekaligus pemulihan kognitif pekerja.

Tiga faktor lingkungan lain, yaitu kebisingan, pencahayaan, dan getaran, masing-masing baru dikaji dalam satu studi sebagai faktor tunggal. Namun, ketiganya menunjukkan dampak yang signifikan terhadap kinerja melalui mekanisme yang berbeda-beda. Hong et al., (2023) menemukan bahwa intensitas kebisingan berhubungan dengan penurunan produktivitas kerja melalui jalur persepsi auditori, Li et al. (2024) mengidentifikasi rentang pencahayaan optimal antara 100 hingga 150 lux untuk meminimalkan kelelahan visual melalui jalur persepsi visual, sedangkan Simeonov et al. (2011) menunjukkan bahwa getaran acak pada kaki pekerja meningkatkan ketidakstabilan postur melalui jalur sensorik taktil dan vestibular. Meskipun jalur pengaruhnya berbeda, ketiga studi tersebut secara konsisten membuktikan bahwa faktor lingkungan di luar ketinggian dan panas juga berkontribusi nyata terhadap penurunan kinerja atau keselamatan pekerja. Temuan getaran pada Simeonov et al. (2011) relevan dengan temuan postural pada studi-studi ketinggian, karena kedua jenis paparan tersebut sama-sama menurunkan stabilitas tubuh, namun belum ada studi yang menguji kedua faktor tersebut secara bersamaan dalam satu simulasi.

Tabel 2 Matriks Sintesis Temuan Penelitian Berdasarkan Faktor Lingkungan

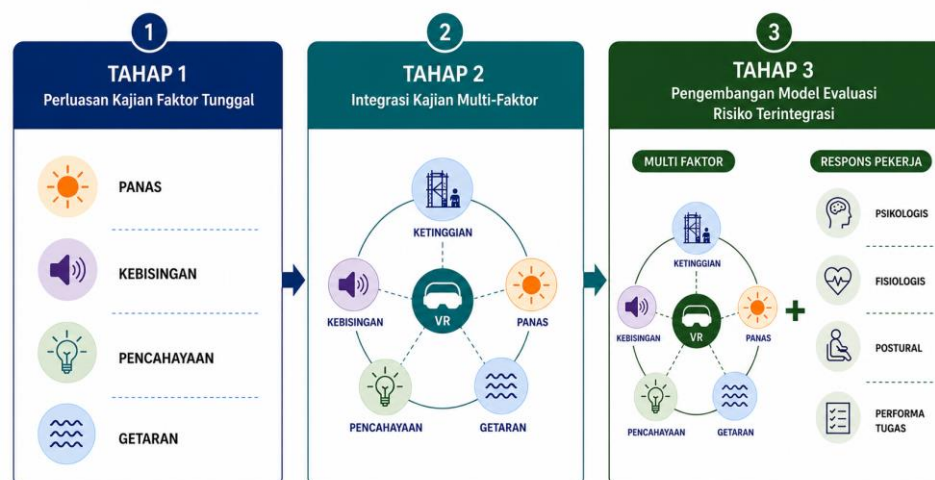
Faktor Lingkungan	Jumlah Studi	Pola Temuan	Kesenjangan Penelitian
Ketinggian	8	Hampir seluruh penelitian menunjukkan bahwa paparan ketinggian virtual meningkatkan gangguan psikologis dan fisiologis serta menurunkan stabilitas postural.	Penelitian yang mengombinasikan ketinggian dengan faktor lingkungan lain dalam satu simulasi VR masih terbatas.
Panas	2	Paparan panas secara konsisten menurunkan fungsi kognitif dan keseimbangan tubuh.	Studi masih terbatas dan didominasi oleh studi dengan paparan tunggal.
Lainnya (kebisingan, pencahayaan, dan getaran)	3	Masing-masing faktor menunjukkan dampak negatif terhadap performa tugas melalui mekanisme yang berbeda.	Studi untuk masing-masing faktor masih terbatas dan belum banyak dievaluasi secara simultan.
Paparan Multi-faktor	3	Efek kombinasi beberapa faktor lebih besar dibandingkan dengan paparan satu faktor.	Variasi kombinasi faktor dan jumlah studi masih terbatas.

Tiga studi yang mengevaluasi kombinasi multifaktor memberikan gambaran yang paling mendekati kondisi lapangan sesungguhnya, karena pekerja konstruksi pada praktiknya jarang terpapar satu faktor lingkungan secara terisolasi. Guo et al. (2025) menunjukkan bahwa kombinasi pencahayaan dan kebisingan meningkatkan beban kognitif, terutama pada tugas dengan tingkat kesulitan tinggi. Ouyang et al. (2025) menunjukkan bahwa kombinasi panas dan kebisingan mengganggu alokasi atensi sehingga menurunkan akurasi identifikasi bahaya, dan Hong et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi kebisingan, getaran, dan debu menghasilkan penurunan kinerja yang lebih besar dibandingkan dengan paparan tunggal masing-masing faktor. Ketiga studi ini secara konsisten menunjukkan bahwa efek gabungan dari paparan multifaktor cenderung lebih besar dibandingkan dengan dampak faktor tunggal. Ringkasan pola temuan berdasarkan faktor lingkungan disajikan pada Tabel 2.

3.4 Kesenjangan Penelitian dan Arah Penelitian Mendatang

Keterbatasan utama penelitian sebelumnya terletak pada masih terbatasnya kajian yang mengevaluasi kombinasi beberapa faktor lingkungan secara simultan, dengan hanya tiga dari enam belas studi yang mengadopsi pendekatan tersebut. Padahal, penelitian yang mengevaluasi kombinasi paparan menunjukkan bahwa dampak yang dihasilkan cenderung lebih besar dibandingkan paparan faktor tunggal (Hong et al., 2024; Ouyang et al., 2025). Selain itu, penelitian yang ada masih didominasi oleh kajian mengenai ketinggian, sedangkan faktor lingkungan lain, seperti panas, getaran, kebisingan, pencahayaan, getaran, dan debu masih relatif jarang dieksplorasi. Berdasarkan kesenjangan tersebut, arah penelitian mendatang dapat disusun dalam tiga tahap pengembangan yang saling berkesinambungan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.

Tahap pertama berfokus pada perluasan kajian terhadap faktor lingkungan yang masih minim diteliti untuk memperkaya pemahaman mengenai dampak masing-masing faktor terhadap pekerja konstruksi. Tahap berikutnya diarahkan pada pengembangan skenario VR yang mampu mensimulasikan kombinasi berbagai faktor lingkungan secara terkontrol sehingga interaksi antar faktor dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh. Tahap akhir difokuskan pada pengembangan model evaluasi risiko yang mengintegrasikan berbagai faktor lingkungan serta respons psikologis, fisiologis, postural, dan performa tugas yang diperoleh dari simulasi VR. Model tersebut diharapkan mampu mendukung penilaian risiko yang lebih menyeluruh dan bisa dijadikan sebagai dasar dalam perancangan strategi keselamatan dan kesehatan kerja pada sektor konstruksi.



Gambar 3 Roadmap arah penelitian mendatang

Tinjauan literatur ini memiliki sejumlah keterbatasan. Pencarian dokumen hanya mencakup tiga basis data (Scopus, ScienceDirect, dan IEEE Xplore) serta dibatasi pada publikasi berbahasa Inggris, sehingga studi relevan yang terindeks di basis data lain atau dipublikasikan dalam bahasa selain Inggris berpotensi tidak tercakup. Jumlah studi yang memenuhi kriteria juga relatif terbatas (16 artikel), khususnya untuk faktor kebisingan, pencahayaan, dan getaran yang masing-masing hanya diwakili oleh satu studi. Oleh karena itu, generalisasi temuan untuk faktor-faktor tersebut perlu dilakukan secara hati-hati. Penilaian risiko bias terhadap studi yang disertakan juga belum dilakukan dalam tinjauan ini.

4. KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menyintesis 16 artikel yang diperoleh melalui metode PRISMA dari 903 dokumen awal pada tiga basis data untuk memetakan pemanfaatan VR dalam mengevaluasi faktor-faktor lingkungan kerja konstruksi. Hasil kajian menunjukkan bahwa ketinggian merupakan faktor yang paling banyak diteliti, sedangkan panas, kebisingan, pencahayaan, getaran, debu, dan kombinasi multifaktor masih relatif terbatas. Selain itu, seluruh studi menunjukkan bahwa VR mampu mereplikasi kondisi lingkungan kerja secara aman dan terkendali serta efektif digunakan untuk mengevaluasi respons psikologis, fisiologis, postural, dan performa pekerja tanpa mengekspos mereka pada risiko nyata. Temuan ini memperkuat pemanfaatan VR sebagai media evaluasi ergonomi dan penilaian risiko K3 konstruksi, sekaligus menjadi dasar bagi pengembangan simulasi dan strategi keselamatan yang lebih representatif terhadap kondisi kerja nyata. Oleh karena itu, pengembangan penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada perluasan kajian faktor lingkungan, pengembangan simulasi multifaktor, serta penyusunan model evaluasi risiko yang mengintegrasikan berbagai faktor lingkungan dan berbagai respons pekerja untuk mendukung pengambilan keputusan K3 di sektor konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akindele, N., Taiwo, R., Sarvari, H., Oluleye, B. I., Awodele, I. A., & Olaniran, T. O. (2024). A state-of-the-art analysis of virtual reality applications in construction health and safety. *Results in Engineering*, 23(June), 102382. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102382>
- Arachchige, S. N. K., Chander, H., Turner, A. J., Shojaei, A., Knight, A. C., Griffith, A., Burch, R. F., & Chen, C. C. (2023). Physiological and Subjective Measures of Anxiety with Repeated Exposure to Virtual Construction Sites at Different Heights. *Safety and Health at Work*, 14(3), 303–308. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.07.005>
- 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>
- Bureau of Labor Statistics. (2023). 36 Work-related Deaths Due to Environmental Heat Exposure in 2021. U.S. Bureau of Labor Statistics. <https://www.bls.gov/opub/ted/2023/36-work-related-deaths-due-to-environmental-heat-exposure-in-2021.htm>
- Bureau of Labor Statistics. (2025). *The Economics Daily, Fatal falls in the construction industry in 2023*. U.S. Department of Labor.
- Chander, H., Shojaei, A., Deb, S., Kodithuwakku Arachchige, S. N. K., Hudson, C., Knight, A. C., & Carruth, D. W. (2021). Impact of Virtual Reality-Generated Construction Environments at Different Heights on Postural Stability and Fall Risk. *Workplace Health & Safety*, 69(1), 32–40. <https://doi.org/10.1177/2165079920934000>
- Duorinaah, F. X., Olatunbosun, S. O., Won, J. H., Chi, H. L., & Kim, M. K. (2025). Assessment of construction workers' fall-from-height risk using multi-physiological data and virtual reality. *Automation in Construction*,

- 176(November 2024), 106254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106254>
- Eurostat. (2024). *Accidents at work statistics*. Ec.Europa.Eu.
- Guo, Z., Xia, C., Tao, H., Huang, S., & Yang, Y. (2025). Research on Cognitive Load of Tunnel Construction Workers in Different Environments Based on EEG. *Buildings*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/buildings15162920>
- Habibnezhad, M., Puckett, J., Jebelli, H., Karji, A., Fardhosseini, M. S., & Asadi, S. (2020). Neurophysiological testing for assessing construction workers' task performance at virtual height. *Automation in Construction*, 113(February), 103143. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103143>
- Hong, J., Choi, J., Lee, J. H., Cho, S. H., Hong, T., Han, S. U., Park, H. S., & Lee, D. E. (2023). Virtual reality-based analysis of the effect of construction noise exposure on masonry work productivity. *Automation in Construction*, 150(July 2022), 104844. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104844>
- Hong, J., Song, S., Ahn, C., Koo, C., Lee, D. E., Park, H. S., & Hong, T. (2024). Impact of environmental pollutants on work performance using virtual reality. *Automation in Construction*, 168(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105833>
- Ke, S., Xiang, F., Zhang, Z., & Zuo, Y. (2019). A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin. *Procedia CIRP*, 83(March), 753–758. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.103>
- Kisker, J., Gruber, T., & Schöne, B. (2021). Behavioral realism and lifelike psychophysiological responses in virtual reality by the example of a height exposure. *Psychological Research*, 85(1), 68–81. <https://doi.org/10.1007/s00426-019-01244-9>
- Li, J., Zhu, J., & Guan, C. (2024). Assessing illumination fatigue in tunnel workers through eye-tracking technology: A laboratory study. *Advanced Engineering Informatics*, 59(December 2023), 102335. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102335>
- Li, Z., Xiahou, X., Chen, G., Zhang, S., & Li, Q. (2024). EEG-based detection of adverse mental state under multi-dimensional unsafe psychology for construction workers at height. *Developments in the Built Environment*, 19(June), 100513. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100513>
- Man, S. S., Wen, H., & So, B. C. L. (2024). Are virtual reality applications effective for construction safety training and education? A systematic review and meta-analysis. *Journal of Safety Research*, 88(June 2023), 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.11.011>
- Ouyang, Y., Huang, G., & He, S. (2025). Impacts of adverse environmental factors on construction workers' attention allocation during hazard identification: a study of noise and heat exposure. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 32(11), 7469–7485. <https://doi.org/10.1108/ECAM-04-2024-0438>
- Ouyang, Y., & Luo, X. (2025). Effects of physical fatigue superimposed on high temperatures on construction workers' cognitive performance. *Safety Science*, 181(November 2024), 106705. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106705>

-
- Oxford Economics. (2023). *Global Construction Futures*. Oxfordeconomics.Com.
- Peterson, S. M., Furuichi, E., & Ferris, D. P. (2018). Effects of virtual reality high heights exposure during beam-walking on physiological stress and cognitive loading. *PLoS ONE*, 13(7), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200306>
- Shin, Y., Choi, D., Park, H., Lee, M., Hong, T., & Koo, C. (2024). Impact of Heat Stress on Individual Cognitive States: Utilizing EEG Metrics in Immersive VR–Based Construction Safety Training. *Journal of Management in Engineering*, 40(6). <https://doi.org/10.1061/jmenea.meeng-6076>
- Simeonov, P., Hsiao, H., Powers, J., Ammons, D., Kau, T., & Amendola, A. (2011). Postural stability effects of random vibration at the feet of construction workers in simulated elevation. *Applied Ergonomics*, 42(5), 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.10.002>
- Tan, B. W. L., Alhadad, S. B., Tan, G. Z. Y., Sze, P. T. M., Lemke, B., & Lee, J. K. W. (2025). Physical Work in Humid Heat Impairs Postural Balance during Simulated Construction Tasks at Height. In *Medicine and Science in Sports and Exercise* (Issue January). <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003666>
- Tehrani, B. M., Wang, J., & Truax, D. (2022). Assessment of mental fatigue using electroencephalography (EEG) and virtual reality (VR) for construction fall hazard prevention. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(9), 3593–3616. <https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2021-0017>
-