

Kajian Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja di Tapak Bina

Study on the Use of Artificial Intelligence (AI) to Improve the Quality of Worker Safety at Construction Sites

Muhammad Amru Haziq Muhammad Azran¹, Narimah Kasim^{1,2*}

¹ Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan,
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Parit Raja, Batu Pahat, 86400, MALAYSIA

² Centre of Project, Property and Facilities Management Services, Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan,
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Parit Raja, Batu Pahat, 86400, MALAYSIA

*Pengarang Utama: narimah@uthm.edu.my

DOI: <https://doi.org/10.30880/rmtb.2026.07.01.055>

Maklumat Artikel

Diserah: 31 Mac 2026

Diterima: 31 Mei 2026

Diterbitkan: 30 Jun 2026

Kata Kunci

Industri pembinaan, kecerdasan buatan, keselamatan pekerja, tapak bina, teknologi AI

Abstrak

Keselamatan di tapak bina kekal menjadi isu kritikal dalam industri pembinaan di Malaysia. Namun, usaha ke arah peningkatan tahap keselamatan sering berhadapan dengan cabaran seperti kos pelaksanaan teknologi yang tinggi, kekurangan latihan komprehensif yang sesuai, serta ketidakpatuhan terhadap prosedur operasi standard (SOP). Cabaran-cabaran ini memerlukan pendekatan baharu yang lebih proaktif dan berteknologi tinggi seperti penggunaan kecerdasan buatan (AI). Kajian ini bertujuan untuk meneroka potensi kecerdasan buatan (AI) dalam meningkatkan tahap keselamatan pekerja di tapak bina. Objektif kajian merangkumi tiga aspek utama iaitu mengkaji keberkesanan penggunaan AI dalam mempertingkatkan kualiti keselamatan pekerja di tapak bina, mengenal pasti cabaran dalam pelaksanaan teknologi AI, dan mencadangkan langkah-langkah penambahbaikan untuk memperluas penggunaan AI dalam sektor pembinaan. Metodologi kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui temu bual separa berstruktur bersama responden yang terdiri daripada Kontraktor G7, wakil klien, perunding profesional, pegawai dari Lembaga Pembangunan Industri Pembinaan Malaysia (CIDB), serta Jabatan Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan (DOSH). Lokasi kajian meliputi tiga negeri utama pembangunan iaitu Kuala Lumpur, Selangor dan Johor. Data dianalisis menggunakan kaedah analisis tematik bagi mengenal pasti corak dan isu utama berkaitan penggunaan AI. Kajian ini dijangka dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang impak AI terhadap keselamatan di tapak bina serta cabaran pelaksanaannya. Secara keseluruhannya, hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan impak positif kepada industri pembinaan dan institusi pendidikan dalam merangka dasar keselamatan serta kandungan latihan yang lebih berorientasikan teknologi masa hadapan.

Keywords

Artificial intelligence, construction industry, construction site, worker safety

Abstract

Construction site safety remains a critical issue within the Malaysian construction industry. However, efforts to improve safety levels often face challenges such as high technology implementation costs, a lack of comprehensive and appropriate training, and non-compliance with Standard Operating Procedures (SOPs). These challenges necessitate a new approach that is more proactive and technology-driven, such as the application of Artificial Intelligence (AI). This study aims to explore the potential of AI in enhancing worker safety at construction sites. The research objectives encompass three main aspects: examining the effectiveness of AI in improving the quality of worker safety, identifying challenges in the implementation of AI technology, and proposing improvement measures to expand the use of AI in the construction industry. The study utilizes a qualitative approach through semi-structured interviews with respondents consisting of G7 Contractors, client representatives, professional consultants, and officers from CIDB and DOSH. The study locations cover Kuala Lumpur, Selangor, and Johor. Data were analyzed using the thematic analysis method. The findings reveal that AI is highly effective in real-time monitoring through computer vision, which subsequently improves worker discipline. Nevertheless, AI implementation faces significant challenges in terms of high initial costs and worker data privacy issues. To broaden its adoption, significant improvement measures include the provision of government incentives or grants and the standardization of national incident data. Overall, this study provides a positive impact on the construction industry and educational institutions in formulating safety policies and developing training content that is more systematic, effective, and oriented toward future technology.

1. Pengenalan

Tapak pembinaan merupakan antara kawasan kerja paling berisiko tinggi dengan kadar kemalangan yang tinggi. Walaupun pelbagai langkah telah dilaksanakan, isu keselamatan masih berleluasa. Teknologi kecerdasan buatan (AI) dilihat sebagai pendekatan baharu yang dapat mempertingkatkan aspek pemantauan dan pengurusan keselamatan secara masa nyata. Kajian ini dijalankan untuk menilai keberkesanan AI dalam konteks ini, mengenal pasti cabaran utama penggunaannya, serta mencadangkan strategi ke hadapan. Tapak pembinaan merangkumi sektor kerja bangunan dan kejuruteraan yang terdedah kepada pelbagai risiko keselamatan. Statistik CIDB (2023) merekodkan insiden kritikal seperti jatuh, renjatan elektrik, dan kemalangan melibatkan objek berat serta jentera. Meskipun Akta Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan (AKKP 1994) telah dikuatkuasakan, kecuaian manusia dan persekitaran berbahaya tetap menyumbang kepada kadar kemalangan yang tinggi. Sehubungan itu, teknologi Kecerdasan Buatan (AI) dilihat sebagai solusi proaktif melalui keupayaan pemantauan masa nyata dan pengesanan bahaya secara automatik. Walau bagaimanapun, penerapan AI masih terbatas disebabkan oleh kekangan kos, kestabilan akses internet, dan rintangan budaya dalam industri.

Pengabaian terhadap Prosedur Operasi Standard (SOP) antara penyumbang utama kepada kemalangan di tapak bina. Walaupun arahan telah diberikan oleh majikan, sikap endah tak endah pekerja terhadap keselamatan masih berleluasa dan meningkatkan risiko kemalangan. Teknologi kecerdasan buatan (AI) dilihat berpotensi besar dalam menangani isu ini, namun pelaksanaannya dihalang oleh beberapa cabaran utama. Antaranya ialah kos tinggi untuk memperoleh, mengoperasi dan menyelenggara teknologi AI, termasuk kos pembelian peranti, sensor, serta storan data berskala besar. Selain itu, kekurangan latihan dan tahap celik digital yang rendah dalam kalangan pekerja turut menghambat penerimaan dan penggunaan AI secara berkesan. Latihan komprehensif dan berterusan amat diperlukan bagi memastikan kefahaman terhadap penggunaan AI serta penyesuaian dengan perkembangan teknologi semasa. Oleh itu kajian ini Adalah untuk mengkaji keberkesanan, cabaran, dan langkah-langkah penggunaan kecerdasan buatan (AI) bagi meningkatkan kualiti keselamatan pekerja di tapak bina.

2. Kajian Literatur

2.1 Pengurusan Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

Pengurusan keselamatan adalah elemen kritikal dalam memastikan kesejahteraan pekerja dan kelancaran projek. Menurut Zulkifly *et al.* (2023), industri pembinaan mencatatkan kadar kemalangan yang tinggi, justeru memerlukan sistem keselamatan yang mantap. Pelaburan dalam keselamatan mengurangkan kos projek melalui pengurangan insiden. Pematuhan kepada garis panduan keselamatan seperti OSHCIM dapat menurunkan kadar kemalangan. Amalan keselamatan juga meningkatkan moral pekerja, seterusnya meningkatkan produktiviti dan mengurangkan gangguan operasi. Beberapa faktor menyumbang kepada risiko kemalangan di tapak bina, antaranya tekanan jadual kerja, kekurangan latihan, dan persekitaran kerja tidak selamat (Md Sofwan *et al.*, 2016). Keadaan tapak yang tidak teratur, pencahayaan tidak mencukupi, dan peralatan usang meningkatkan kebarangkalian berlakunya insiden. Justeru, faktor-faktor ini perlu dikenalpasti dan ditangani melalui pengurusan keselamatan yang berkesan. Antara strategi utama ialah pelaksanaan audit keselamatan berkala dan latihan keselamatan berterusan. Kajian Zhang *et al.* (2023) mendapati sistem amaran berasaskan AI berupaya meramal risiko secara tepat. Penggunaan CCTV dan sensor IoT membolehkan pemantauan masa nyata, manakala penglibatan pengurusan tertinggi serta latihan berkala menyumbang kepada pembentukan budaya keselamatan yang kukuh. Pendekatan menyeluruh ini dapat mengurangkan kadar kemalangan secara signifikan. Antara cabaran utama ialah pertukaran tenaga kerja yang kerap dan kurangnya penglibatan pengurusan atasan. Selain itu, kepelbagaian budaya dan bahasa menjejaskan komunikasi keselamatan yang berkesan. Ketidakpatuhan terhadap peraturan keselamatan pula menjadi isu kritikal akibat tekanan menyelesaikan projek dalam tempoh singkat. Oleh itu, pendekatan sistematik dan sokongan menyeluruh daripada semua pihak diperlukan bagi meningkatkan keberkesanan pengurusan keselamatan.

2.2 Penggunaan AI dalam Keselamatan Pekerja

2.2.1 Pemantauan Tapak Bina Secara Masa Nyata

Teknologi AI membolehkan pemantauan keselamatan secara automatik melalui CCTV pintar, dron dan sensor. Sistem ini dapat mengesan pelanggaran keselamatan seperti ketidakpatuhan PPE dan kehadiran di zon larangan (Ur-Rehman *et al.*, 2022). AI juga dapat meramalkan risiko berdasarkan pergerakan pekerja dan data sejarah tapak. Tambahan itu, sensor IoT berintegrasi AI membolehkan pemantauan suhu, getaran, dan kualiti udara secara langsung, sekaligus mengurangkan kebergantungan terhadap pemeriksaan manual.

2.2.2 Analisis Data untuk Pengurusan Risiko

AI berupaya menganalisis data besar seperti laporan insiden dan log aktiviti untuk mengenal pasti corak risiko. Teknik pembelajaran mesin membolehkan sistem membina model ramalan kemalangan berdasarkan faktor seperti cuaca dan status peralatan. Pendekatan ini membolehkan tindakan pencegahan dirancang lebih berfokus dan berasaskan data, serta mengurangkan kebergantungan kepada penilaian subjektif manusia.

2.2.3 Penggunaan Sistem Pengenalpastian Automatik (*Computer Vision*)

AI menggunakan teknologi penglihatan komputer untuk mengenal pasti pekerja yang melanggar peraturan keselamatan seperti tidak memakai PPE atau memasuki zon bahaya. Sistem ini beroperasi secara masa nyata dan boleh menyimpan rekod pelanggaran secara automatik. Gabungan dengan pengesanan wajah meningkatkan ketepatan pengesanan pelaku berulang, sekaligus menyokong pematuhan undang-undang keselamatan dengan lebih berkesan.

2.2.4 Sistem Amaran Awal dan Respon Kecemasan

AI turut dimanfaatkan dalam sistem amaran awal untuk mengesan ancaman seperti ketidakstabilan struktur atau pendedahan bahan kimia. Sistem ini membolehkan tindakan segera seperti pengosongan tapak dan pengaktifan protokol keselamatan. Integrasi AI dengan teknologi BIM membolehkan simulasi senario kecemasan serta penjaan plan tindak balas secara automatik, memastikan tindak balas yang lebih efisien dan berasaskan data.

2.3 Keberkesanan Penggunaan AI

2.3.1 Peningkatan Tahap Keselamatan Pekerja

AI meningkatkan keselamatan tapak bina melalui pemantauan masa nyata dan pengesanan risiko automatik. Teknologi computer vision dan analisis data besar membolehkan pengesanan pelanggaran keselamatan dan memberi amaran segera. Penggunaan AI turut membantu mengenal pasti kawasan berisiko tinggi serta merancang langkah pencegahan yang lebih proaktif (Junjia *et al.*, 2025). Kajian menunjukkan peningkatan keselamatan sebanyak 15% dalam tempoh dua tahun hasil penggunaan sistem AI.

2.3.2 Pengoptimuman Proses Operasi di Tapak Bina

AI mengoptimumkan proses operasi melalui perancangan logistik, penyelenggaraan prediktif dan penjadualan kerja automatik. Sistem ini membantu mengurangkan pembaziran masa, mencegah kecuaiian akibat kelam-kabut, dan meningkatkan keselamatan operasi. Pengurusan tenaga kerja juga lebih cekap apabila AI digunakan untuk memperuntukkan tugas mengikut kompetensi individu (Sargiotis *et al.*, 2024).

2.3.3 Peningkatan Kecekapan Latihan Keselamatan

Teknologi AI seperti realiti maya (VR) dan sistem latihan adaptif menjadikan latihan lebih interaktif dan berkesan. Kajian menunjukkan AI membantu meningkatkan pemahaman keselamatan pekerja sehingga 50% serta mempercepatkan proses latihan. Simulasi berasaskan data sebenar membolehkan pekerja mengalami situasi berisiko secara maya tanpa pendedahan kepada bahaya sebenar (Ahn *et al.*, 2019).

2.3.4 Penurunan Kadar Kemalangan dan Kecederaan

Integrasi AI dalam sistem keselamatan tapak bina menyumbang kepada penurunan kadar kecederaan sehingga 17% dan kematian sebanyak 40% (Adnan, 2025). AI juga membantu merekod dan menganalisis insiden kecil yang sering terlepas pandang, serta menyediakan sistem amaran berasaskan geolokasi untuk mencegah insiden seperti jatuh dari tempat tinggi.

2.3.5 Pengurangan Kos Operasi dan Pembaziran Sumber

AI membantu dalam perancangan bajet dan kawalan kos melalui pengurusan inventori pintar, ramalan keperluan bahan, dan sistem penyelenggaraan prediktif. Ini mengelakkan pembaziran, memaksimumkan jangka hayat aset, serta mengurangkan risiko kelewatan projek akibat kerosakan mengejut (Lyu, 2024).

Jadual 1 Keberkesanan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) untuk Meningkatkan Keselamatan Pekerja Di tapak Bina

No.	Keberkesanan penggunaan kecerdasan buatan (AI)	Penulis
1.	Peningkatan Tahap Keselamatan Pekerja	Junjia <i>et al.</i> (2025)
2.	Pengoptimuman Proses Operasi di Tapak Bina	Sargiotis <i>et al.</i> (2022)
3.	Peningkatan Kecekapan Latihan Keselamatan	Ahn <i>et al.</i> (2019)
4.	Penurunan Kadar Kemalangan dan Kecederaan	Adnan (2025)
5.	Pengurangan Kos Operasi dan Pembaziran Sumber	Lyu (2024)

2.4 Cabaran Penggunaan AI

2.4.1 Kekurangan Data Berkualiti dan Isu Integrasi

AI memerlukan data yang lengkap, konsisten dan tersusun. Namun dalam industri pembinaan, data sering bersifat tidak berstruktur dan tersebar merentasi sistem berbeza, menyukarkan proses integrasi. Ketiadaan piawaian penyimpanan data menyebabkan sistem AI sukar diintegrasikan dengan sistem sedia ada (Regona *et al.*, 2022). Ini menjejaskan prestasi AI dalam mengenal pasti risiko keselamatan.

2.4.2 Kekhuatiran Etika dan Privasi Data

Pemantauan pekerja melalui kamera dan sensor AI boleh menimbulkan isu privasi dan etika, terutamanya tanpa persetujuan jelas (Huang *et al.*, 2021). Ketelusan algoritma juga menjadi isu apabila keputusan AI sukar difahami dan dipertanggungjawabkan. Tanpa garis panduan etika dan undang-undang yang jelas, risiko penyalahgunaan data dan ketidakadilan boleh berlaku.

2.4.3 Kekhuatiran Etika dan Privasi Data

Kos pelaksanaan AI meliputi perkakasan, latihan, penyesuaian infrastruktur dan penyelenggaraan berkala. Ini menjadi penghalang terutamanya kepada firma kecil dan sederhana. Tambahan pula, pulangan pelaburan yang tidak menentu menyukarkan justifikasi kewangan untuk melaksanakan teknologi ini secara meluas (Xu *et al.*, 2025).

2.4.4 Kekurangan Kepakaran dan Pengetahuan AI

Pelaksanaan AI memerlukan tenaga kerja mahir dalam bidang sains data dan pembangunan sistem, yang masih kurang dalam sektor pembinaan. Kos tinggi untuk melatih pekerja atau mengupah pakar luar turut menjadi cabaran utama. Jurang pengetahuan antara pakar AI dan profesional pembinaan juga menyukarkan kolaborasi efektif (Ghosh *et al.*, 2025).

2.4.5 Risiko Ketergantungan Berlebihan Terhadap Teknologi

Ketergantungan melampau terhadap AI boleh melemahkan keupayaan membuat keputusan manual. Kegagalan sistem, serangan siber, atau keputusan yang tidak sesuai dengan konteks tempatan boleh mengancam keselamatan operasi (Omrany *et al.*, 2023). Justeru, peranan manusia masih penting sebagai pengawas, terutama dalam situasi luar jangka.

Jadual 2 Cabaran Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) untuk Meningkatkan Keselamatan Pekerja Di tapak Bina

No.	Cabaran penggunaan kecerdasan buatan (AI)	Penulis
1.	Kekurangan Data Berkualiti dan Isu Integrasi	Regona <i>et al.</i> (2022)
2.	Kekhuatiran Etika dan Privasi Data	Huang <i>et al.</i> (2021)
3.	Kos Pelaksanaan dan Penyelenggaraan yang Tinggi	Xu <i>et al.</i> (2025)
4.	Kekurangan Kepakaran dan Pengetahuan AI	Ghosh <i>et al.</i> (2025)
5.	Risiko Ketergantungan Berlebihan terhadap Teknologi	Omrany <i>et al.</i> (2023)

2.5 Langkah-Langkah Penambahbaikan

2.5.1 Meningkatkan Literasi Digital dan Kemahiran Teknologi dalam Kalangan Pekerja

Latihan dan pendidikan berterusan sangat penting bagi meningkatkan pemahaman serta penerimaan pekerja terhadap penggunaan AI. Kurangnya pengetahuan menyebabkan halangan dalam pelaksanaan teknologi di tapak bina. Kajian menunjukkan latihan khusus dalam AI dan analitik data meningkatkan produktiviti serta mengurangkan kesilapan (Pan *et al.*, 2021). Program latihan sistematik turut membantu merapatkan jurang kemahiran antara pekerja.

2.5.2 Menyediakan Dasar dan Sokongan Institusi yang Kukuh

Sokongan dasar daripada kerajaan dan institusi penting bagi menggalakkan penggunaan AI. Insentif, dana R&D dan strategi AI kebangsaan dapat mendorong penerapan teknologi secara lebih luas (OECD, 2021). Polisi berkaitan keterbukaan data, keselamatan siber, dan privasi membantu meningkatkan keyakinan pengguna.

2.5.3 Mewujudkan Infrastruktur Teknologi yang Menyokong Integrasi AI

AI memerlukan infrastruktur digital yang kukuh seperti internet berkelajuan tinggi, storan awan dan sistem pintar. Tanpa kemudahan ini, kecekapan AI tidak dapat direalisasikan sepenuhnya. Integrasi AI dengan teknologi sedia ada seperti BIM dan IoT perlu ditampung oleh sistem yang stabil dan boleh dinaik taraf dengan kos efektif (Pan *et al.*, 2022).

2.5.4 Mewujudkan Kerjasama antara Industri dan Institusi Akademik

Kerjasama ini membolehkan pembangunan model AI yang praktikal dan bersesuaian dengan keperluan industri. Institusi akademik menyediakan bakat, penyelidikan, dan makmal inovasi yang menyokong penerapan AI di tapak sebenar (Esangbedo *et al.*, 2023). Pelajar juga mendapat pendedahan awal terhadap aplikasi AI dalam pembinaan.

2.5.5 Menangani Isu Etika dan Privasi dalam Penggunaan AI

Garis panduan etika yang jelas perlu dibangunkan untuk melindungi data pekerja dan mengekalkan kepercayaan terhadap teknologi (Floridi *et al.*, 2018). Polisi privasi yang telus dan pelaporan beretika dapat mengurangkan kebimbangan terhadap pemantauan berasaskan AI. Penilaian impak etika secara berterusan turut diperlukan bagi menjamin pelaksanaan AI yang bertanggungjawab.

Jadual 3 Langkah-Langkah Meningkatkan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) untuk Meningkatkan Keselamatan Pekerja Di tapak Bina

No.	Langkah-langkah untuk meningkatkan penggunaan kecerdasan buatan (AI)	Penulis
1.	Meningkatkan Literasi Digital dan Kemahiran Teknologi dalam Kalangan Pekerja	Pan <i>et al.</i> (2021)
2.	Menyediakan Dasar dan Sokongan Institusi yang Kukuh	OECD (2021)
3.	Mewujudkan Infrastruktur Teknologi yang Menyokong Integrasi AI	Pan <i>et al.</i> (2022)
4.	Mewujudkan Kerjasama antara Industri dan Institusi Akademik	Esangbedo <i>et al.</i> (2023)
5.	Menangani Isu Etika dan Privasi dalam Penggunaan AI	Floridi <i>et al.</i> (2018)

3. Metodologi Kajian

3.1 Reka Bentuk Kajian

Kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif yang memberi penekanan kepada pengalaman, pandangan, dan makna yang dikongsi oleh individu dalam konteks penggunaan AI di tapak bina (Creswell, 2013). Kaedah ini membolehkan penyelidik mendapatkan gambaran menyeluruh tentang potensi, cabaran dan strategi pelaksanaan AI dalam pemantauan keselamatan. Temu bual separa berstruktur telah dijalankan bersama individu yang mempunyai pengalaman luas dalam bidang ini, termasuk eksekutif teknikal, pengurus pembangunan perniagaan, penyelia tapak, dan wakil agensi kerajaan. Kaedah ini membolehkan penerokaan topik secara fleksibel dan mendalam. Di samping itu, analisis kandungan ke atas bahan bertulis dan data sekunder juga digunakan untuk mengenal pasti tema dan corak berkaitan keberkesanan AI dalam konteks keselamatan tapak bina (Patton, 2015). Gabungan kaedah ini memberikan kefahaman menyeluruh yang menyokong dapatan kajian dan membolehkan penyelidik mengenal pasti implikasi praktikal terhadap industri pembinaan.

Jadual 4 Reka Bentuk Kajian

No.	Objektif Kajian	Kaedah
1.	Mengkaji keberkesanan penggunaan kecerdasan buatan (AI) bagi meningkatkan kualiti keselamatan pekerja di tapak bina.	• Kajian Literatur • Kaedah Kualitatif (Temu Bual Separu Berstruktur)
2.	Mengkaji cabaran penggunaan kecerdasan buatan (AI) bagi meningkatkan kualiti keselamatan pekerja di tapak bina.	
3.	Menentukan langkah-langkah untuk meningkatkan penggunaan kecerdasan buatan (AI) bagi meningkatkan kualiti keselamatan pekerja di tapak bina.	

3.2 Pengumpulan Data

Data primer dikumpul melalui temu bual separa berstruktur bersama responden yang terdiri daripada jurutera, pengurus teknologi AI, pengurus projek, dan penyelia keselamatan. Kaedah ini membolehkan penyelidik mendapatkan pandangan langsung berkaitan penggunaan AI dalam meningkatkan keselamatan pekerja secara masa nyata. Temu bual ini membekalkan maklumat mendalam yang relevan dengan konteks sebenar di tapak pembinaan. Bagi data sekunder pula diperolehi daripada buku, jurnal, artikel internet dan laporan penyelidikan dalam talian seperti Google Scholar. Kajian literatur ini memberi rangka kerja teori, mengenal pasti jurang penyelidikan dan menyokong triangulasi data. Ia turut membantu dalam meningkatkan kesahan kajian.

3.3 Populasi dan Sampel

Populasi kajian terdiri daripada pihak yang terlibat dalam pelaksanaan AI dan pengurusan keselamatan di tapak bina Malaysia seperti kontraktor G7, perunding, pengurus AI, serta wakil CIDB dan DOSH. Mereka dipilih berdasarkan pengetahuan dan pengalaman mendalam dalam aplikasi AI dan keselamatan pembinaan. Pemilihan ini selaras dengan Dasar Kecerdasan Buatan Kebangsaan yang mengutamakan digitalisasi sektor pembinaan. Kaedah persampelan bertujuan digunakan bagi memilih responden yang berkecukupan. Individu yang dipilih mewakili pelbagai peranan profesional dalam industri bagi memastikan variasi pandangan yang relevan.

3.4 Soalan Temu Bual

3.4.1 Temu Bual Berstruktur

Temu bual berstruktur melibatkan penggunaan set soalan tetap yang sama kepada setiap responden bagi memastikan keseragaman dan konsistensi data. Soalan yang dibangunkan memfokus kepada aspek penggunaan dan keberkesanan AI di tapak bina. Kaedah ini memudahkan perbandingan respons dan mempercepatkan proses analisis.

3.4.2 Temu Bual Tidak Berstruktur

Kaedah ini membenarkan perbualan lebih terbuka tanpa soalan tetap. Ia digunakan untuk mendapatkan maklumat tambahan yang lebih mendalam atau untuk meneroka isu yang timbul semasa sesi temu bual. Pendekatan ini memberi ruang kepada responden berkongsi pandangan mereka secara bebas dan mendalam.

3.4.3 Temu Bual Separa Berstruktur

Temu bual separa berstruktur menggabungkan elemen berstruktur dan tidak berstruktur. Responden terdiri daripada kontraktor G7, pengurus projek, pengurus teknologi AI, dan penyelia keselamatan tapak bina yang dipilih berdasarkan kepakaran dalam penggunaan AI. Panduan temu bual disediakan berdasarkan objektif kajian dan membolehkan penyelidik meneroka topik dengan lebih fleksibel. Prosedur dijalankan secara sistematik dan beretika dengan pemakluman awal kepada peserta. Soalan temu bual merangkumi lima bahagian seperti berikut.

Bahagian A: Latar belakang responden

Bahagian B: Pengetahuan mengenai AI dalam keselamatan tapak bina

Bahagian C: Keberkesanan penggunaan AI

Bahagian D: Cabaran pelaksanaan AI

Bahagian E: Langkah-langkah penambahbaikan penggunaan AI

3.4.4 Kajian Rintis

Kajian rintis dijalankan sebagai ujian awal berskala kecil sebelum kajian utama dilaksanakan. Tujuan kajian rintis adalah untuk menilai kejelasan, keberkesanan dan kebolehgunaan instrumen kajian, khususnya panduan temu bual separa berstruktur (Creswell, 2013). Dalam kajian ini, seorang kontraktor G7 dan seorang pakar akademik dari UTHM dipilih sebagai responden bagi menilai sama ada soalan yang dirangka dapat menghasilkan respons yang bernas dan sejajar dengan objektif kajian.

3.5 Analisis Data

Analisis data dalam kajian ini dijalankan menggunakan pendekatan analisis kandungan kualitatif, yang sesuai dengan kaedah pengumpulan data melalui temu bual separa berstruktur. Proses ini merangkumi penyusunan, penapisan dan pengkodan data sebelum mengenal pasti tema dan corak penting (Smith et al., 2019). Data dianalisis secara sistematik bagi mengenal pasti makna tersirat, mesej utama, serta konteks sosial yang berkaitan. Langkah ini membolehkan penyelidik membuat kesimpulan yang menyokong objektif kajian serta mencadangkan penambahbaikan berdasarkan penemuan yang diperolehi.

4. Analisis Data dan Perbincangan

Kajian rintis merupakan langkah awal berskala kecil yang bertujuan meningkatkan kualiti dan kecekapan kajian utama menerusi perancangan yang lebih rapi. Dalam kajian ini, ujian rintis melibatkan seorang pensyarah dan seorang kontraktor G7 sebagai responden. Melalui proses ini, beberapa kesilapan dikenal pasti dan diperbaiki, sekali gus membantu penyelidik bersedia untuk sesi temu bual sebenar. Ringkasan maklum balas dan penambahbaikan yang telah dilaksanakan diperincikan dalam Jadual 5.

Jadual 5 Kajian Rintis

No.	Ulasan	Penambahbaikan
1.	Soalan yang digunakan dalam temu bual didapati terlalu panjang, dan ia menyebabkan responden untuk sukar memahami makna sebenar soalnya.	panjang soalan mestilah dipendekkan tanpa mengubah soalnya asal, supaya setiap soalan adalah lebih jelas dan difahami oleh responden.
2.	Melibatkan penggunaan istilah atau perkataan kompleks, dan yang boleh mengelirukan dan menjadikan sukar bagi responden memberikan jawapan yang tepat.	Istilah atau perkataan yang kompleks mestilah diberi penerangan ringkas sebelum mengajukan soalan supaya responden dapat memahami konteks dan makna perkataan itu.

4.1 Latar Belakang Responden

Kajian ini melibatkan lima responden yang dipilih berdasarkan kepakaran dalam sektor pembinaan, kejuruteraan, keselamatan, dan teknologi. Kepelbagaian latar belakang ini memberikan perspektif menyeluruh daripada aspek operasi tapak sehingga penggunaan teknologi AI yang canggih. Gabungan responden ini merangkumi pelbagai sudut pandang termasuk operasi tapak bina, pematuhan regulasi kerajaan, pengurusan keselamatan, penyelenggaraan teknikal, dan kepakaran teknologi AI.

Jadual 6 Latar Belakang Responden

Responden	R1	R2	R3	R4	R5
Jenis Syarikat	Syarikat pembinaan dan Kejuruteraan (GAMUDA) (Kelas G7)	Jabatan Kerja Raya (JKR)	Lembaga Pembangunan Industri Pembinaan Malaysia (CIDB)	Syarikat Pembinaan (Scientex)	Syarikat drone dan teknologi AI (Aerodyne)
Jawatan	Penyelia tapak bina	Jurutera	Pengurus Keselamatan, kesihatan alam sekitar dan kualiti	Eksekutif kanan kejuruteraan	Jurutera AI
Pengalaman	3tahun	5 tahun	9 tahun	6 tahun	8 tahun

Skop Kerja	- Memastikan kerja mengikut pelan - Memantau kerja tapak - Mengurus dan mengawasi	- Kuatkuasakan SOP keselamatan di tapak. - Merancang dan menyelia penyelenggaraan mesin	- Memantau dan menyelesaikan masalah teknikal - Menyediakan laporan prestasi mesin.	- Bangunkan algoritma AI untuk analisis data. - Mengurus pemprosesan data pemeriksaan, dan analitik industri.	- Menyemak dan mengoptimalkan model AI untuk ketepatan & prestasi.
Pengalaman menggunakan teknologi AI	1 tahun	2 tahun	6 tahun	3 tahun	8 tahun

4.2 Pengetahuan Mengenai Teknologi Kecerdasan Buatan (AI)

Responden mempunyai pengetahuan dan kepakaran mendalam mengenai teknologi AI hasil pengalaman ekstensif (seperti R1 dan R2 dengan 15 tahun pengalaman), namun mereka belum mengaplikasikannya secara langsung dalam pengurusan keselamatan di tapak bina. Penyelidik menyimpulkan bahawa integrasi AI bagi tujuan keselamatan dalam industri pembinaan di Malaysia masih belum menyeluruh. Perincian tahap pengetahuan responden disediakan dalam Jadual 7. Berdasarkan Jadual 7, yang merumuskan tahap pemahaman responden mengenai teknologi kecerdasan buatan (AI), semua responden (R1, R2, R3, R4, dan R5) melaporkan bahawa mereka mempunyai pengalaman dalam penggunaan teknologi AI.

Jadual 7 Rumusan Pengetahuan Mengenai Teknologi Kecerdasan Buatan (AI)

Penyataan	R1	R2	R3	R4	R5
Pengetahuan Mengenai Teknologi Kecerdasan Buatan (AI)					
Pendedahan kepada teknologi kecerdasan buatan (AI)	✓	✓	✓	✓	✓

4.3 Keberkesanan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja di Tapak Bina

Implementasi AI menawarkan transformasi signifikan melalui respons insiden yang pantas, amaran bahaya automatik, dan pemantauan lokasi pekerja secara persis. Majoriti responden mengesahkan keupayaan AI dalam memberikan amaran bahaya automatik, manakala R1 menekankan keberkesanannya dalam analisis data jangka panjang. Dalam situasi kecemasan, R3 menggariskan peranan kritikal AI untuk menjejaki lokasi pekerja bagi memastikan proses pemindahan mangsa dilakukan dengan lebih efisien. Selain aspek teknikal, pengawasan berterusan ini memberikan impak psikologi yang mendalam terhadap budaya kerja. Sebagaimana yang dinyatakan oleh R3:

"Apabila pekerja tahu bahawa sistem AI sentiasa memantau pergerakan mereka, wujud satu bentuk disiplin sendiri yang lebih kuat. Mereka menjadi lebih berhati-hati dan patuh kepada SOP bukan kerana takut kepada penyelia, tetapi kerana sedar bahawa teknologi pintar ini merekodkan setiap tindakan mereka secara objektif."

Secara tuntas, integrasi AI bukan sahaja mengurangkan risiko kecederaan fizikal di tapak bina, malah membina akauntabiliti pekerja terhadap prosedur keselamatan melalui pemantauan yang telus dan objektif. Maklum balas terperinci mengenai potensi ini dirumuskan dalam Jadual 8.

Jadual 8 Rumusan Keberkesanan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

1. Peningkatan Tahap Keselamatan Pekerja					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana sistem AI seperti computer vision digunakan dalam memantau pergerakan dan keselamatan pekerja di tapak bina?	✓	X	X	✓	✓
b) Bagaimanakah pemantauan berterusan melalui AI memberi kesan kepada tingkah laku pekerja dari segi pematuhan prosedur keselamatan?	✓	✓	✓	X	X
2. Pengoptimuman Proses Operasi di Tapak Bina					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana AI membantu menyusun jadual kerja dengan lebih efisien dan mengurangkan kelewatan projek bagi memastikan keselamatan pekerja?	✓	X	✓	X	✓
b) Bagaimana AI digunakan dalam pengurusan tenaga kerja untuk menyediakan tugas dengan lebih cekap dan selamat mengikut kecekapan pekerja?	X	✓	✓	X	✓
3. Peningkatan Kecekapan Latihan Keselamatan					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Sejauh mana penggunaan teknologi VR berasaskan AI membantu pekerja memahami situasi bahaya sebenar di tapak bina?	✓	✓	X	X	✓
b) Adakah latihan berasaskan AI seperti simulasi kejadian sebenar di tapak bina dapat meningkatkan amalan keselamatan sebenar pekerja?	X	X	✓	✓	✓
4. Penurunan Kadar Kemalangan dan Kecederaan					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana sistem amaran AI berasaskan geolokasi membantu mengenal pasti serta memberi amaran kepada pekerja yang berada dalam zon bahaya?	✓	✓	X	X	✓
b) Bagaimana AI membantu merekod dan menganalisis insiden kecil yang sering diabaikan bagi membolehkan pencegahan awal dilaksanakan?	✓	X	✓	X	✓
5. Pengurangan Kos Operasi dan Pembaziran Sumber					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana predictive maintenance berasaskan AI membantu mengesan awal kerosakan mesin bagi mencegah kemalangan di tapak bina?	✓	X	X	✓	✓
b) Bagaimana AI membantu meningkatkan keselamatan pekerja sambil menjimatkan kos projek pembinaan?	✓	✓	✓	X	X

4.4 Cabaran Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

Pelaksanaan AI dalam keselamatan tapak bina berdepan lima kekangan utama: kekurangan data berkualiti, isu etika, kos tinggi, jurang kepakaran, dan risiko ketergantungan teknologi. Cabaran paling fundamental ialah ketiadaan pakar yang menguasai gabungan disiplin IT dan kejuruteraan awam, yang menyukarkan penilaian keberkesanan sistem di semua peringkat organisasi. Masalah ini diburukkan lagi oleh ketidakseragaman data dan kos permulaan yang tinggi, sekali gus mengehendkan aplikasi AI kepada projek mega sahaja. Selain itu, isu privasi memerlukan polisi yang telus melalui Explainable AI bagi mengekalkan akauntabiliti. Mengenai kesukaran mendapatkan tenaga pakar, R5 menjelaskan:

"Cabarannya bukan sekadar mencari jurutera AI, tetapi mencari pakar yang memahami selok-belok risiko HSE di tapak bina. Jurutera IT standard biasanya tidak faham konteks bahaya pembinaan, manakala pakar pembinaan pula jarang mahir dalam teknikal AI. Jurang kombinasi kemahiran inilah yang sangat sukar ditemui ketika ini."

Akhir sekali, terdapat risiko ketergantungan melampau yang boleh menumpulkan naluri penilaian risiko manusia. Justeru, integrasi AI memerlukan pendekatan holistik yang mengimbangi kemajuan teknologi dengan pembangunan modal insan serta garis panduan etika yang jelas (Sywelem, 2024).

Jadual 9 Rumusan Cabaran Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

1. Kekurangan Data Berkualiti dan Isu Integrasi					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana ketiadaan data standard menjejaskan keupayaan AI?	X	X	✓	✓	✓
b) Bagaimana kekurangan data tepat/mencukupi menjejaskan prestasi AI?	✓	X	✓	X	✓
2. Kekhuatiran Etika dan Privasi Data					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana memastikan pengumpulan data pekerja dilakukan secara telus dan beretika?	✓	X	✓	X	✓
b) Bagaimana kekaburan dalam pengumpulan/analisis data menjejaskan akauntabiliti keselamatan?	X	X	✓	X	✓
3. Kos Pelaksanaan dan Penyelenggaraan yang Tinggi					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana kos permulaan pelaksanaan AI mempengaruhi peningkatan kualiti keselamatan pekerja?	✓	✓	X	✓	X
b) Adakah kos tersembunyi seperti penyesuaian infrastruktur dan latihan memberi kesan kepada keselamatan pekerja?	✓	X	✓	X	✓
4. Kekurangan Kepakaran dan Pengetahuan AI					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana jurang pengetahuan antara pekerja dan teknologi AI menjejaskan keberkesanan keselamatan?	✓	X	X	✓	X
b) Apakah cabaran mendapatkan pakar luar bagi latihan penggunaan AI?	X	✓	✓	X	✓
5. Risiko Ketergantungan Berlebihan terhadap Teknologi					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5

a) Apakah risiko terhadap keselamatan pekerja jika operasi tapak bina terlalu bergantung pada sistem AI?	✓	✓	✓	X	X
b) Bagaimana memastikan AI tidak menggantikan keputusan manusia dalam situasi kritikal?	X	✓	✓	✓	✓

4.5 Langkah-Langkah Untuk Meningkatkan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

Perluasan AI memerlukan pendekatan holistik melalui tiga teras utama: pemerksaan modal insan, pengukuhan dasar, dan infrastruktur digital. Peningkatan literasi digital melalui simulasi VR dan latihan praktikal adalah kritikal bagi memastikan penerimaan teknologi oleh pekerja. Dari sudut autoriti, mandat daripada agensi kerajaan melalui spesifikasi kontrak adalah pemacu paling berkesan. Sebagaimana ditegaskan oleh R2:

"Pihak berkuasa seperti JKR perlu mula mewajibkan integrasi BIM dan elemen AI dalam spesifikasi projek awam berskala besar. Apabila ia menjadi syarat wajib dalam kontrak, industri akan mempunyai dorongan lebih kuat untuk melabur, sekali gus mewujudkan standard baharu bagi seluruh pasaran."

Selain itu, integrasi AI bersama IoT dan BIM memerlukan infrastruktur 5G yang mantap untuk pengesanan risiko masa nyata. Strategi ini harus diiringi kerjasama industri-akademik bagi membina saluran bakat, serta pengurusan etika yang telus bagi menjamin keputusan akhir keselamatan tetap di bawah kendali manusia (Elrifaae et al., 2025).

Jadual 10 Rumusan Langkah-Langkah Untuk Meningkatkan Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI) Bagi Meningkatkan Kualiti Keselamatan Pekerja Di Tapak Bina

1. Meningkatkan Literasi Digital dan Kemahiran Teknologi dalam Kalangan Pekerja					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Apakah latihan/pendekatan terbaik untuk meningkatkan literasi digital pekerja?	✓	X	X	✓	✓
b) Bagaimana tahap celik digital pekerja mempengaruhi keberkesanan penggunaan AI?	✓	X	✓	X	✓
2. Menyediakan Dasar dan Sokongan Institusi yang Kukuh					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Apakah dasar kerajaan utama yang perlu ada untuk menyokong penggunaan AI dalam keselamatan pekerja?	✓	✓	✓	X	X
b) Bagaimana insentif (dana R&D/potongan cukai) dapat mendorong syarikat melabur dalam AI?	X	✓	✓	✓	X
3. Mewujudkan Infrastruktur Teknologi yang Menyokong Integrasi AI					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Apakah infrastruktur asas yang diperlukan sebelum tapak bina melaksanakan sistem AI sepenuhnya?	✓	✓	X	X	✓
b) Sejauh mana integrasi teknologi (IoT dan BIM) penting dalam menyokong keberkesanan sistem AI?	✓	✓	X	✓	✓
4. Mewujudkan Kerjasama antara Industri dan Institusi Akademik					
Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana kerjasama dengan institusi akademik dapat membantu pembangunan penyelesaian AI yang relevan?	X	✓	✓	X	✓

b) Apakah bentuk kerjasama paling praktikal bagi membolehkan pelajar dan penyelidik menyumbang? X X ✓ ✓ ✓

5. Menangani Isu Etika dan Privasi dalam Penggunaan AI

Soalan	R1	R2	R3	R4	R5
a) Bagaimana menangani isu etika dan privasi dalam pengumpulan data pekerja?	✓	X	✓	X	✓
b) Bagaimana memastikan AI tidak menggantikan keputusan manusia dalam situasi kritikal?	✓	✓	✓	✓	X

5. Kesimpulan

Pendekatan tradisional tidak lagi memadai untuk menangani kompleksiti risiko di tapak bina. Penggunaan AI melalui computer vision dan analitik data terbukti mampu meningkatkan patuhan keselamatan, mengurangkan kadar kemalangan, serta mengoptimumkan operasi melalui sistem amaran awal. Selain itu, teknologi ini merevolusikan latihan keselamatan melalui simulasi interaktif yang lebih berkesan. Walau bagaimanapun, kejayaan integrasi AI bergantung kepada penyelesaian isu kos, kepakaran teknikal, dan kerangka etika. Strategi jangka panjang melalui pembangunan bakat, infrastruktur digital, serta kerjasama industri-akademia adalah kritikal bagi memastikan peralihan yang mampan. Secara tuntas, AI bukan sekadar inovasi masa hadapan, tetapi keperluan mendesak dalam era pembinaan moden untuk mentransformasikan budaya kerja yang lebih selamat, cekap, dan bertanggungjawab demi kesejahteraan pekerja di Malaysia.

Penghargaan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan serta Universiti Tun Hussein Onn Malaysia atas sokongan yang diberikan.

Konflik Kepentingan

Penulis mengumumkan bahawa tidak ada konflik kepentingan yang berkaitan dengan penerbitan makalah ini.

Sumbangan Penulis

Penulis mengesahkan sumbangan kepada kertas ini seperti berikut: **konsepsi dan reka bentuk kajian:** Muhammad Amru Haziq Muhammad Azran, Narimah Kasim; **pengumpulan data:** Muhammad Amru Haziq Muhammad Azran; **analisis dan interpretasi hasil:** Muhammad Amru Haziq Muhammad Azran, Narimah Kasim; **penyediaan draf manuskrip:** Muhammad Amru Haziq Muhammad Azran, Narimah Kasim. Semua penulis telah mengkaji hasil dan meluluskan versi terakhir manuskrip.

Rujukan

- Adnan, T.B.T.N. (2025, April 28). Kadar kemalangan kematian di tempat kerja menurun. Sinar Harian. <https://www.sinarharian.com.my/article/725510/berita/nasional/kadar-kemalangan-kematian-di-tempat-kerja-menurun>
- Ahn, C.R., Lee, S., Sun, C., Jebelli, H., Yang, K., Choi, B. (2019). Wearable Sensing Technology Applications in Construction Safety and Health. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(11), 03119007, 1-17. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001708.
- Bryman, A. (2016). Social research methods (5th ed.). United Kingdom: Oxford University Press.
- Construction Industry Development Board (CIDB). (2023, Julai 27). Pencegahan Kemalangan Di Tapak Pembinaan. CIDB Malaysia. <https://www.cidb.gov.my/pencegahan-kemalangan-di-tapak-pembinaan/>
- Creswell, J. W. (2013). Qualitative inquiry & research design: Choosing among five approaches (3rd ed.). United States: Sage Publications.
- Elrifae, M., Zayed, T., Ali, A. H., Ibrahim, A., & Wang, R. D. (2025). A holistic evaluation of success factors for advancing IoT adoption through mitigating barriers in construction site safety. Internet of Things, 31, 101595. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101595>
- Esangbedo, C.O., Zhang, J., Esangbedo, M.O., Kone, S.D., Xu, L. (2023). The role of industry-academia collaboration in enhancing educational opportunities and outcomes under the digital driven Industry 4.0. *Journal of Infrastructure, Policy and Development* 8(1): 2569. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i1.2569>
- Floridi, L., Cows, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., Luetge, C.,

- Madelin, R., Pagallo, U., Rosssi, F., Schafer, B., Valcke, P., Vayena, E. (2018). AI4People—An Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations, 28(4), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>
- Ghosh, D.P. (2025). AI Strategy for the Construction Industry. Engineering Design & Research Center, Larsen & Toubro Construction (M&M) Kolkata, India. 1-18. DOI:10.13140/RG.2.2.24005.3632
- Huang, Y., Zuo, J., Shi, Q., Chen, J. (2021). Research Status and Challenges of Data-Driven Construction Project Management in the Big Data Context. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2021/6674980>
- Junjia, Y., Alias, A.H., Haron, N.A., Bakar, N.A. (2025). Deep learning for safety risk management in modular construction: Status, strengths, challenges, and future directions. *Automation In Construction*, 169, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105894>
- Lyu, Y. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Construction. Proceedings of Privacy-Preserving Intrusion Detection: Empowering Security with Federated Learning, 24-34. DOI: 10.54254/2755-2721/90/20241707
- Md Sofwan, N., Zaini, A. A., & Mahayuddin, S. A. (2016). Preliminary Study on the Identification of Safety Risks Factors in the High Rise Building Construction. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 78(5). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8505>
- Omrany, H., Al-Obaidi, K.M., Husain, A., Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability*, 15, 10908, 1-26. <https://doi.org/10.3390/su151410908>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). The OECD Framework for the Classification of AI Systems. *OECD Publishing*. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/02/oecd-framework-for-the-classification-of-ai-systems_336a8b57/cb6d9eca-en.pdf
- Pan, Y., Zhang, L., Mario, C. (2023). Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 1081-1110. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09830-8>
- Patton, M. Q. (2015). Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice (4th ed.). *Sage Publications*.
- Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., Li, R.Y.M. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 8(45), 1-31. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010045>
- Sargiotis, D. (2024). Advancing Civil Engineering with AI and Machine Learning: From Structural Health to Sustainable Development. *International Journal of Architecture and Planning*, 4(2), 54-81. doi: 10.51483/IJARP.4.2.2024.54-81
- Smith, J., Flowers, P., & Larkin, M. (2019). Qualitative research methods: A practical guide. *United States: Wiley*.
- Sywelem, M. M. G., & Mahklouf, A. M. E. (2024). Ethical Considerations in the Integration of Artificial Intelligence in Education: An Overview. *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, 01–15. <https://doi.org/10.5121/csit.2024.141201>
- Ur-Rehman, M.S., Shafiq, M.T., Ullah, F. ((2022). Automated Computer Vision-Based Construction Progress Monitoring: A Systematic Review, *MDPI*, 12, 1037, 1-32. <https://doi.org/10.3390/buildings12071037>
- Xu, J., Li, J., Chen, X. (2025). Assessment of technology adoption in construction safety management: Case study in China. Special Collection: Emerging Technology Management in the Construction Industry: Innovations, Challenges, and Future Directions - *Engineering & Technology*, 107(4), 1-21. <https://doi.org/10.1177/00368504241304198>
- Zhang, C., Li, H., & Li, Y. (2023). An AI-powered early warning system for construction safety risk prediction. *Automation in Construction*, 148, 104796. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104796>
- Zulkifly, S.S., Ranjan, M.Z. (2024). Penguatkuasaan pematuhan perundangan berkaitan keselamatan dan kesihatan pekerjaan di sektor pembinaan, 15(1), 361-383. <https://doi.org/10.32890/uumjls2024.15.1.15>