



Original Article

Harnessing Artificial Intelligence for Sustainable Smart Construction: A PRISMA-Based Systematic Review

Memanfaatkan Kecerdasan Buatan untuk Pembinaan Pintar Mampan: Satu Kajian Sistematis Berasaskan PRISMA



Khoo Terh Jing^{*1} , Ha Chin Yee 

¹ Department of Construction Project Management, School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800 Minden, Pulau Pinang, Malaysia

* Correspondence email: terhjing@usm.my

Abstract

The construction industry is undergoing a significant technological transformation, with Artificial Intelligence (AI) playing a pivotal role in improving efficiency, sustainability, and decision-making. As complex projects evolve, traditional manual methods often lead to inefficiencies, delays, and increased safety risks. AI has emerged as a vital tool for optimizing construction processes, though there remains an incomplete understanding of its applications across various project stages. This study systematically identifies key AI applications that enhance smart construction throughout planning, design, execution, operation, and demolition phases. A Systematic Literature Review (SLR) was employed following the PRISMA framework, leading to the collection of 23 relevant articles from the Web of Science database. Descriptive and bibliometric analyses were conducted using VOSviewer to assess publication trends, research methodologies, geographical distribution, and the co-occurrence of AI-related keywords. Findings indicate that AI significantly aids in predictive analytics for risk assessment, generative design, construction monitoring, safety management, supply chain optimization, energy efficiency, and smart maintenance through digital twins. Furthermore, AI advances real-time site monitoring, waste sorting, and sustainability-driven deconstruction planning, which supports the implementation of the circular economy in construction. This study provides a structured overview of AI's contribution to smart construction, offering insights to academics, policymakers, and industry professionals on driving the integration of AI in the built environment. The goal is to foster safer, more efficient, and sustainable construction practices in the future.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

Article Info

Received 2 January 2025

Received in revised form 16 March 2025

Accepted 27 April 2025

Available online 5 June 2025

Keywords

Artificial Intelligence
Construction
Digital Transformation
Smart Construction
Sustainable
Kecerdasan Buatan
Pembinaan
Transformasi Digital
Pembinaan Pintar
Mampan

Abstrak

Industri pembinaan sedang mengalami transformasi teknologi, dengan Kecerdasan Buatan (AI) memainkan peranan penting dalam meningkatkan kecekapan, kemampunan, dan pembuatan keputusan. Seiring dengan peningkatan kompleksiti projek pembinaan, kaedah manual tradisional dan berasaskan pengalaman sering menyebabkan ketidakcekapan, kelewatan, lebihan kos, serta risiko keselamatan. AI telah muncul sebagai alat yang berkuasa untuk mengoptimumkan proses pembinaan, namun masih terdapat kekurangan pemahaman yang menyeluruh mengenai aplikasinya dalam pelbagai peringkat projek. Kajian ini bertujuan untuk mengenal pasti secara sistematik aplikasi utama AI dalam mempromosikan pembinaan pintar sepanjang fasa perancangan, reka bentuk, pelaksanaan, operasi, dan perobohan. Kajian Sistematik (SLR) telah dijalankan menggunakan rangka kerja PRISMA, dengan 23 artikel berkaitan diperoleh daripada pangkalan data Web of Science. Analisis deskriptif dan bibliometrik telah dilakukan menggunakan VOSviewer bagi meneliti trend penerbitan, metodologi penyelidikan, taburan geografi, serta kejadian bersama kata kunci berkaitan AI. Penemuan kajian menunjukkan bahawa AI memberikan sumbangan yang ketara dalam analitik ramalan untuk penilaian risiko, reka bentuk generatif, pemantauan pembinaan automatik, pengurusan keselamatan, pengoptimuman rantai bekalan, kecekapan tenaga, serta penyelenggaraan pintar melalui kembar digital. Selain itu, AI juga meningkatkan pemantauan tapak secara masa nyata, penyisihan sisa, dan perancangan pembongkaran berorientasikan kemampunan, sekali gus menyokong ekonomi kitaran dalam industri pembinaan. Kajian ini menyumbang dengan menyediakan gambaran terstruktur mengenai peranan AI dalam pembinaan pintar, serta menawarkan pandangan bernilai kepada ahli akademik, pembuat dasar, dan profesional industri dalam mendorong integrasi AI di persekitaran binaan. Akhirnya, ini membawa kepada amalan pembinaan yang lebih selamat, cekap, dan mampan.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

1. Pengenalan

Industri pembinaan sedang mengalami transformasi digital yang didorong oleh kemunculan teknologi seperti Kecerdasan Buatan (AI), Pemodelan Maklumat Bangunan (BIM), dan Internet Benda (IoT). AI, khususnya, merevolusikan amalan pembinaan tradisional dengan meningkatkan kecekapan, mengurangkan kos, dan mempromosikan kemampunan melalui automasi, analitik data, dan pemodelan ramalan [1]. Aplikasi AI merangkumi pelbagai peringkat projek pembinaan, dari perancangan dan reka bentuk hingga operasi dan perobohan, menawarkan penyelesaian untuk pembuatan keputusan pintar, pemantauan masa nyata, dan pengurusan sumber yang dioptimumkan [2]. Namun, walaupun berpotensi besar, masih terdapat kekurangan pemahaman yang menyeluruh mengenai aplikasinya di pelbagai peringkat projek [1,3]. Oleh itu, kajian ini bertujuan untuk mengenal pasti secara sistematik aplikasi utama AI dalam mempromosikan pembinaan pintar sepanjang fasa perancangan, reka bentuk, pelaksanaan, operasi, dan perobohan.

Fokus utama kajian ini adalah untuk meneroka aplikasi utama AI di pelbagai peringkat projek pembinaan. Secara khusus, AI telah digunakan dalam perancangan bagi penilaian risiko ramalan dan anggaran kos [2], dalam reka bentuk untuk mengoptimumkan penggunaan bahan dan integriti struktur [4], serta dalam pelaksanaan pembinaan bagi pemantauan tapak secara masa nyata dan pengurusan keselamatan [1]. Selain itu, aplikasi AI dalam operasi fasiliti merangkumi penggunaan kembar digital dan sensor IoT untuk penyelenggaraan ramalan serta pengoptimuman tenaga [5]. Fasa perobohan juga mendapat manfaat daripada ramalan sisa berasaskan AI dan strategi ekonomi kitaran yang meningkatkan usaha kemampunan [6]. Aplikasi ini menonjolkan impak transformatif AI dalam persekitaran binaan.

Sehubungan itu, kajian ini dipandu oleh persoalan penyelidikan utama: Apakah aplikasi utama kecerdasan buatan dalam mempromosikan pembinaan pintar di pelbagai peringkat projek pembinaan? Dengan menggunakan rangka kerja PRISMA, kajian sistematik ini mensintesis literatur sedia ada untuk menyediakan gambaran menyeluruh mengenai peranan AI dalam pembinaan pintar dan potensinya dalam merubah industri. Dengan menangani persoalan penyelidikan ini, kajian ini bertujuan untuk menyumbang pandangan bernilai kepada ahli akademik, pengamal industri, dan pembuat dasar dalam usaha memanfaatkan AI untuk sektor pembinaan yang lebih mampan dan cekap.

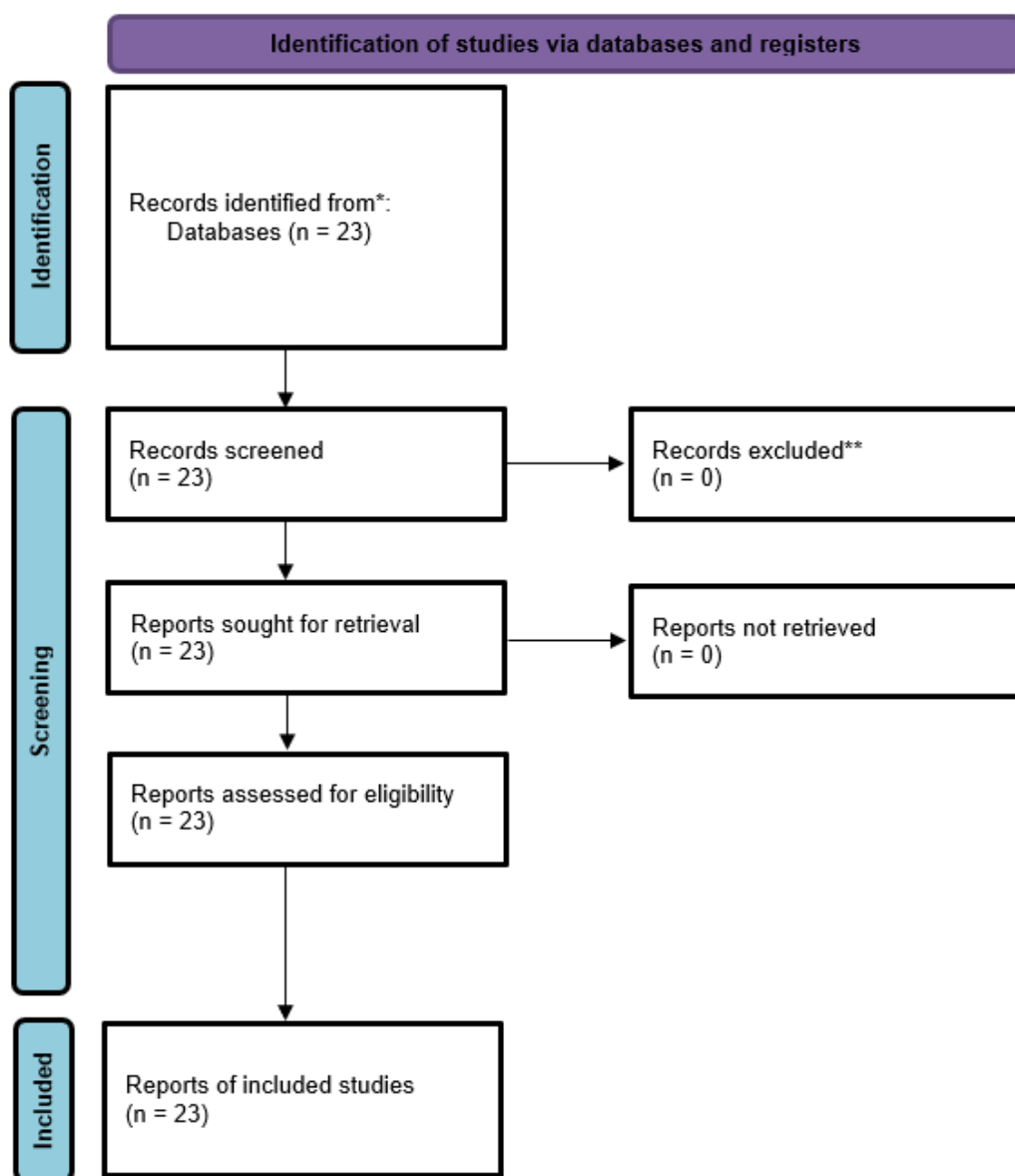
2. Metodologi

Dalam Kajian Literatur Sistematik, pemilihan pangkalan data harus dilakukan dahulu. Oleh itu, Web of Science dipilih dalam kajian ini atas beberapa sebab kukuh. Pertama, Web of Science merupakan salah satu pangkalan data akademik yang paling berprestij dan komprehensif, menyediakan akses kepada jurnal berimpak tinggi dan telah ditelaah rakan sebidang merentasi pelbagai disiplin. Ini memastikan bahawa artikel-artikel yang dipilih adalah berkualiti tinggi dan menepati kriteria-kriteria dalam proses semakan yang ketat. Selain itu, Web of Science menawarkan fungsi pencarian lanjutan, termasuk penjejakan sitasi, yang membantu mengenal pasti kajian utama dan trend penyelidikan berpengaruh dalam kecerdasan buatan dan pembinaan pintar. Pangkalan data ini juga menyokong penyaringan sistematik melalui penapis yang jelas, seperti jenis dokumen, bidang penyelidikan, dan tahun penerbitan, yang memudahkan proses penyempurnaan hasil carian serta pengecualian kajian yang tidak relevan. Berbanding pangkalan data lain, Web of Science mempunyai proses pengindeksan yang ketat, memastikan hanya sumber yang berkualiti tinggi dan boleh dipercayai dimasukkan, sejajar dengan keperluan ketelitian dalam kajian berasaskan PRISMA. Oleh itu, penggunaan Web of Science mengukuhkan kredibiliti dan ketepatan kajian ini dengan menyediakan akses kepada koleksi ilmiah yang luas berkaitan pembinaan pintar berasaskan AI.

Bagi memastikan pemilihan literatur yang menyeluruh dan berkualiti tinggi, kajian ini menggunakan pertanyaan carian Boolean berikut dalam pangkalan data Web of Science: ("Artificial Intelligence" OR "AI" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Neural Networks") AND ("Smart Construction" OR "Intelligent Construction" OR "AI in Construction" OR "Digital Construction" OR "Construction 4.0") AND ("Sustainability" OR "Sustainable Construction" OR "Green Construction" OR "Energy Efficiency" OR "Environmental Impact"), dengan julat penerbitan dari 2015 hingga 2024. Pemilihan kata kunci ini merangkumi terminologi yang luas dan khusus berkaitan aplikasi AI dalam pembinaan pintar mampan, memastikan kajian yang relevan dari pelbagai disiplin, termasuk kejuruteraan, seni bina, dan teknologi pembinaan, turut dipertimbangkan. Penggunaan operator Boolean meningkatkan ketepatan carian dengan membolehkan fleksibiliti dalam menangkap pelbagai istilah yang digunakan dalam literatur. Julat masa 2015 hingga 2024 dipilih untuk menumpukan kepada kemajuan terkini dan trend yang muncul dalam pembinaan pintar berasaskan AI, serta memastikan kajian ini mencerminkan perkembangan teknologi dan inisiatif kemampanan terkini dalam industri. Pendekatan sistematik ini memastikan bahawa hanya artikel berkualiti tinggi yang telah ditelaah rakan sebidang dipertimbangkan untuk kajian ini, sejajar dengan metodologi PRISMA.

Rajah 1 menunjukkan proses pemilihan kajian menggunakan metodologi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Dalam peringkat identifikasi, sebanyak 23 rekod telah dikenal pasti daripada pangkalan data, dan kesemua rekod ini diteruskan ke peringkat saringan. Tiada rekod yang dikecualikan pada peringkat saringan, dan semua 23 laporan telah dicari untuk mendapatkan akses. Tiada laporan yang gagal diperolehi, membolehkan kesemua 23 laporan dinilai untuk kelayakan. Akhirnya, selepas proses penilaian kelayakan, kesemua 23 laporan disertakan

dalam kajian ini, menunjukkan bahawa tiada penapisan atau pengecualian diperlukan sepanjang proses ini.



Rajah 1: Proses pemilihan kajian.

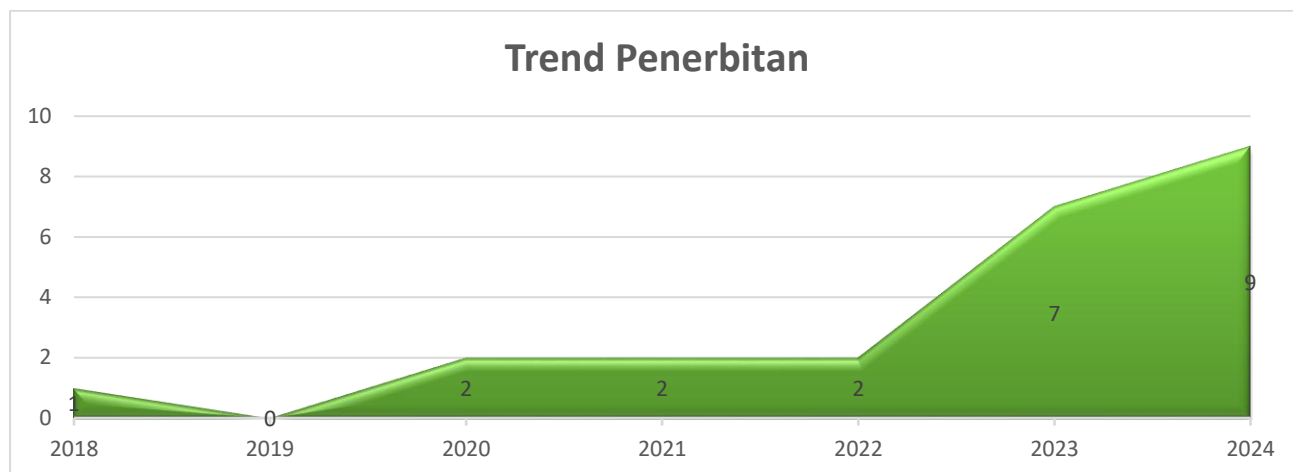
Kajian ini menggunakan kriteria kemasukan dan pengecualian yang ketat untuk memastikan hanya artikel yang relevan dan berkualiti digunakan dalam analisis sistematik. Dari segi tahun penerbitan, hanya artikel yang diterbitkan dalam tempoh 2015 hingga 2024 dipilih bagi memastikan kajian ini merangkumi perkembangan terkini dalam aplikasi Kecerdasan Buatan (AI) dalam pembinaan, manakala artikel yang diterbitkan sebelum tahun 2015 dikecualikan kerana dianggap kurang relevan dengan teknologi semasa. Dari aspek jenis dokumen, hanya artikel jurnal berindeks, kertas persidangan, dan kajian sistematik dimasukkan, manakala artikel yang tidak melalui proses semakan rakan sebaya, seperti laporan teknikal, tesis, atau blog, dikecualikan kerana kurangnya ketulenan akademik. Dalam bidang kajian, hanya penyelidikan yang berkaitan dengan AI dalam industri pembinaan dan pembinaan

pintar dipertimbangkan, sementara kajian yang tidak berkaitan dengan AI dalam pembinaan dikecualikan. Dari segi aksesibiliti, hanya artikel teks penuh yang boleh diakses melalui pangkalan data akademik seperti Web of Science dipilih, manakala artikel yang hanya tersedia dalam bentuk abstrak tanpa akses penuh dikecualikan bagi memastikan kesahan maklumat dan rujukan lengkap dapat digunakan dalam kajian ini.

Jadual 1: Kriteria Kemasukan dan Pengecualian Artikel.

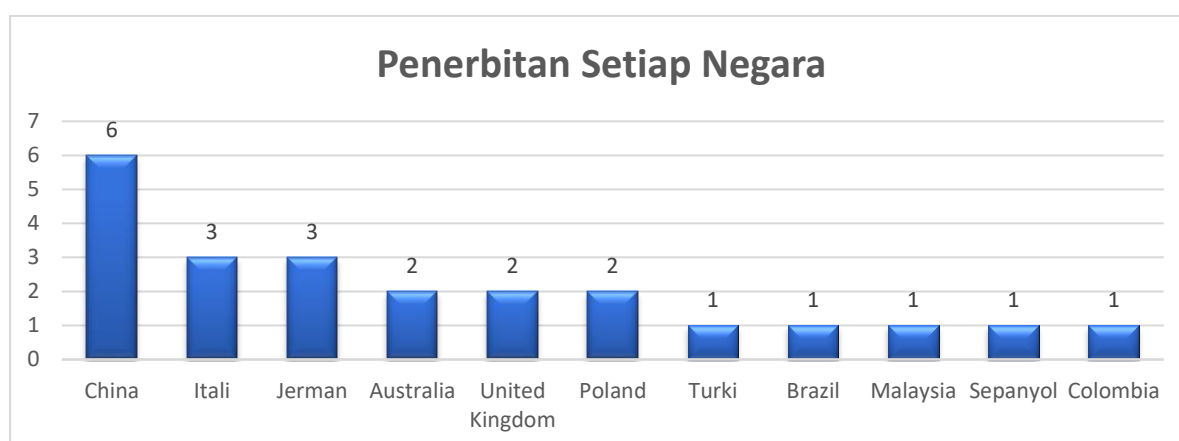
Kriteria	Kemasukan	Pengecualian
Tahun Penerbitan	Artikel yang diterbitkan antara 2015 - 2024	Artikel yang diterbitkan sebelum tahun 2015
Jenis Dokumen	Artikel jurnal berindeks, kertas persidangan, kajian sistematik	Artikel yang tidak melalui semakan rakan sebaya (contoh: laporan teknikal, tesis, blog)
Bidang Kajian	Kajian berkaitan Kecerdasan Buatan (AI) dalam pembinaan dan Pembinaan Pintar	Kajian yang tidak berkaitan dengan AI dalam industri pembinaan
Aksesibiliti	Artikel yang penuh (full-text) dan boleh diakses melalui pangkalan data akademik seperti Web of Science	Artikel yang hanya tersedia dalam bentuk abstrak tanpa akses penuh

Rajah 2 menonjolkan minat penyelidikan yang semakin meningkat terhadap pembinaan pintar berasaskan AI dalam tempoh lima tahun yang lalu, dengan peningkatan ketara dalam penerbitan bermula dari tahun 2022. Sebanyak 23 artikel berkaitan telah dikenal pasti dalam kajian ini, menunjukkan penggunaan teknologi AI yang semakin pesat dalam industri Seni Bina, Kejuruteraan, dan Pembinaan. Penyelidikan awal antara 2018 hingga 2021 kekal relatif stabil, mencerminkan eksplorasi asas mengenai aplikasi AI dan pembelajaran mesin untuk pengoptimuman pengurusan [7,8]. Namun, peningkatan mendadak dalam penerbitan dari tahun 2022 ke atas menunjukkan peralihan ke arah pelaksanaan AI yang lebih maju, termasuk kembar digital untuk penyelenggaraan pintar [9] dan automasi berasaskan AI untuk pemantauan tapak pembinaan [10]. Trend ini sejajar dengan peningkatan integrasi AI, IoT, dan robotik dalam usaha meningkatkan kecekapan, keselamatan, dan kemampuan dalam pembinaan. Pertumbuhan berterusan penyelidikan AI dalam pembinaan mencadangkan perubahan paradigma, di mana AI semakin diterima sebagai penyelesaian utama untuk menangani cabaran industri yang berterusan, mengukuhkan kepentingan transformasi digital dalam sektor pembinaan.



Rajah 2: Trend penerbitan.

Rajah 3 menonjolkan minat global dan sumbangan dalam bidang pembinaan pintar berasaskan AI. China mendahului pengeluaran penyelidikan, dengan jumlah penerbitan tertinggi, mencerminkan pelaburan besar negara tersebut dalam AI, automasi, dan transformasi digital dalam pembinaan [11,12]. Selepas China, Itali dan Jerman telah menyumbang secara signifikan, dengan penekanan kepada aplikasi AI dalam pembinaan cekap tenaga dan infrastruktur mampan [8,13]. Australia, United Kingdom, dan Poland juga menunjukkan minat yang semakin meningkat, terutamanya dalam pembinaan mampan [14,15]. Sementara itu, Turki, Brazil, Malaysia, Sepanyol, dan Colombia turut menyumbang kepada penyelidikan AI dengan memberi tumpuan kepada integrasi bandar pintar, dan aplikasi AI dalam sektor pembinaan [10,16]. Kepelbagaian geografi penerbitan ini menunjukkan bahawa aplikasi AI dalam pembinaan tidak terhad kepada satu rantau sahaja, tetapi merupakan sebahagian daripada pergerakan global ke arah digitalisasi, kemampanan, dan peningkatan kecekapan dalam persekitaran binaan. Penemuan ini menekankan kepentingan kerjasama antarabangsa dalam penyelidikan AI, kerana setiap rantau menyumbang perspektif unik dan kemajuan tersendiri dalam bidang ini.



Rajah 3: Penerbitan setiap negara.

Jadual 2 menonjolkan pelbagai platform akademik yang menyumbang kepada penyelidikan pembinaan pintar berasaskan AI. Dua jurnal utama, Buildings dan Journal of Building Engineering, masing-masing dengan tiga penerbitan, menekankan peranan AI dalam kecekapan tenaga, kemampanan, dan automasi dalam pembinaan [15,17]. Selain itu, Infrastructures, Energies, dan Sustainability masing-

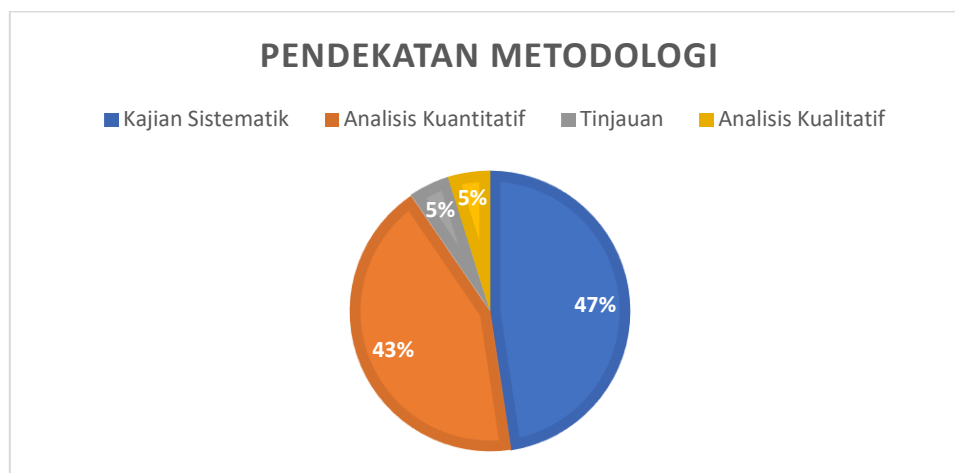
masing telah menerbitkan dua artikel, menunjukkan pendekatan antara disiplin yang kuat yang mengintegrasikan aplikasi AI dengan teknologi bangunan mampan serta transformasi digital dalam projek pembinaan [8,18]. Jurnal lain, seperti Heliyon dan Environmental Science and Pollution Research, mencerminkan minat yang semakin meningkat dalam penilaian impak alam sekitar berasaskan AI dan kaedah pembinaan mesra alam [14,19]. Kehadiran jurnal kejuruteraan dan teknologi khusus, termasuk Engineering Applications of Artificial Intelligence dan Developments in the Built Environment, menunjukkan bahawa AI semakin memainkan peranan dalam automasi pembinaan lanjutan dan analitik ramalan untuk infrastruktur pintar [11]. Penyebaran jurnal yang luas ini membuktikan bahawa penyelidikan AI dalam pembinaan bersifat sangat antara disiplin, melibatkan bidang seperti kejuruteraan, kemampunan, kecerdasan buatan, dan pembangunan bandar, sekali gus menunjukkan minat global yang semakin berkembang dalam mengintegrasikan AI ke dalam persekitaran binaan.

Jadual 2: Penerbitan setiap jurnal.

Jurnal	Nombor
Buildings	3
Journal of Building Engineering	3
Infrastructures	2
Energies	2
Sustainability	2
Heliyon	1
Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Muhendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi	1
Environmental Science and Pollution Research	1
Construction Research Congress 2024: Advanced Technologies, Automation, and Computer Applications in Construction	1
SN Applied Sciences	1
Engineering Applications of Artificial Intelligence	1
Bauingenieur	1
2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (Es2de)	1
Ain Shams Engineering Journal	1
Developments in the Built Environment	1
Results in Engineering	1

Rajah 4 menunjukkan pendekatan metodologi yang pelbagai dalam aplikasi AI dalam pembinaan pintar. Seperti yang ditunjukkan dalam rajah, kajian sistematik menyumbang bahagian terbesar (47%), mencerminkan penekanan yang kuat terhadap penilaian berasaskan literatur, analisis trend, dan sintesis pengetahuan mengenai integrasi AI dalam industri Seni Bina, Kejuruteraan, dan Pembinaan. Peratusan yang tinggi ini menunjukkan fokus terhadap pemahaman keadaan semasa penggunaan AI, mengenal pasti jurang penyelidikan, serta mencadangkan hala tuju masa depan [17,20]. Seterusnya, analisis kuantitatif (43%) mewakili bahagian yang besar, menunjukkan penggunaan model AI yang semakin berkembang, teknik statistik, dan penilaian prestasi dalam meramalkan risiko, mengoptimumkan tenaga, dan mengautomasikan proses pembinaan [8,21]. Kajian berasaskan tinjauan (5%) pula memberikan pandangan yang terhad tetapi berharga mengenai peluang dalam pelaksanaan AI [14]. Akhirnya, analisis kualitatif (5%) menekankan kajian kes dan temu bual pakar, yang menyumbang kepada wawasan eksploratori mengenai aplikasi AI dalam dunia sebenar, implikasi dasar, serta kolaborasi

antara manusia dan AI dalam pembinaan [16]. Kepelbagaian kaedah penyelidikan ini mencerminkan penerokaan multidimensi terhadap AI dalam pembinaan, yang menggabungkan wawasan teori dan penilaian empirikal berasaskan data, memastikan pemahaman menyeluruh mengenai peranan transformatif AI dalam persekitaran binaan.



Rajah 4: Pendekatan metodologi.

Rajah 5 menunjukkan pengagihan yang seimbang antara artikel kajian sistematik (48%), artikel penyelidikan asal (43%), dan kertas prosiding persidangan (9%), yang mencerminkan kepelbagaian penyelidikan AI dalam pembinaan pintar. Peratusan tinggi artikel kajian sistematik (48%) menunjukkan fokus akademik yang kuat terhadap sintesis trend AI, penilaian peranannya dalam pelbagai fasa pembinaan, dan mengenal pasti jurang penyelidikan untuk kajian masa depan [18,22]. Kajian sistematik menyediakan pandangan menyeluruh mengenai pemodelan ramalan berasaskan AI, automasi keselamatan, dan aplikasi kembar digital [15]. Kehadiran artikel penyelidikan asal (43%) menunjukkan pertumbuhan kajian empirikal yang menggunakan model AI untuk pengoptimuman pembinaan, kecekapan tenaga, dan penilaian kemampunan [19,21]. Kajian ini menyumbang kepada aplikasi AI yang praktikal, mengesahkan algoritma pembelajaran mesin serta penyelesaian pembinaan pintar yang digunakan dalam dunia sebenar. Sementara itu, kertas prosiding persidangan (9%) menonjolkan penyelidikan baharu yang dibentangkan dalam persidangan berkaitan pembinaan digital, automasi, dan pengoptimuman tenaga [7,23]. Kertas ini memberikan pandangan mengenai model AI eksperimen, kajian rintis, dan rangka kerja inovatif, yang mencerminkan kemajuan terkini dalam integrasi AI dalam persekitaran binaan. Pengagihan pelbagai jenis dokumen ini menggariskan pendekatan berbilang dimensi dalam penyelidikan AI, yang menggabungkan eksplorasi teori, pengesahan eksperimen, dan inovasi berasaskan industri untuk memacu transformasi digital dalam sektor pembinaan.

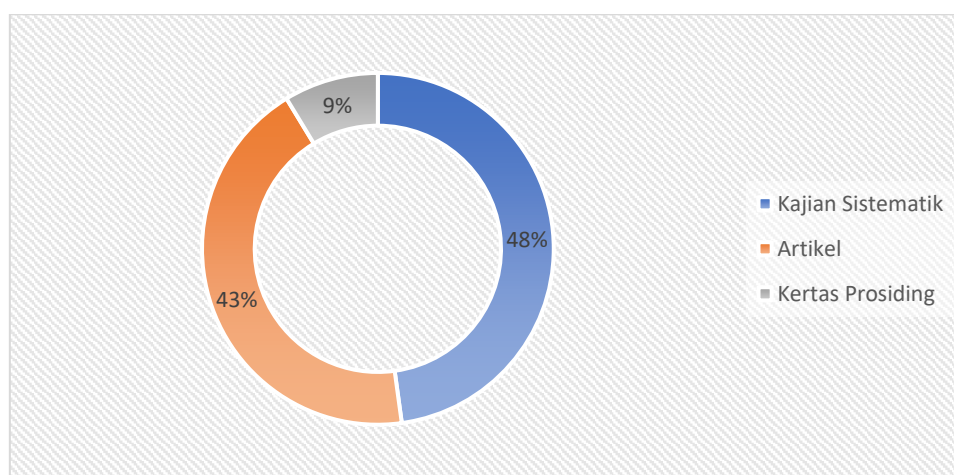
3. Aplikasi Utama Kecerdasan Buatan

3.1. Peringkat Perancangan

3.1.1. Pengoptimuman Reka Bentuk Berasaskan AI

Integrasi AI dalam pengoptimuman reka bentuk telah mengubah cara projek pembinaan dirancang dan dilaksanakan. Alat berkuasa AI seperti BIM dan reka bentuk generatif membolehkan arkitek dan jurutera mengautomatiskan proses reka bentuk yang kompleks, meningkatkan ketepatan dan kecekapan [24]. Melalui algoritma pembelajaran mesin, AI boleh menganalisis data reka bentuk terdahulu dan

mensimulasikan pelbagai alternatif reka bentuk, memilih penyelesaian yang paling cekap, menjimatkan kos, dan mampan [3]. Simulasi berasaskan AI ini mengurangkan ralat manusia, mengoptimumkan prestasi struktur, serta memastikan pematuhan terhadap peraturan pembinaan. Selain itu, AI meningkatkan semakan pematuhan kod secara automatik, memastikan reka bentuk memenuhi piawaian keselamatan dan peraturan alam sekitar tanpa memerlukan semakan manual yang meluas [25].



Rajah 5: Jenis dokumen.

Salah satu kemajuan paling ketara dalam pengoptimuman reka bentuk berasaskan AI ialah reka bentuk generatif, yang membolehkan AI meneroka dan menilai pelbagai alternatif reka bentuk dalam batasan yang telah ditetapkan. Rangkaian adversarial generatif (GANs) dan algoritma evolusi boleh menghasilkan ribuan pilihan reka bentuk berdasarkan kos, kecekapan bahan, penggunaan tenaga, dan integriti struktur, membolehkan arkitek membuat keputusan berdasarkan data [26, 27]. Sebagai contoh, alat reka bentuk berasaskan AI boleh melaraskan susun atur ruang secara automatik untuk meningkatkan pengudaraan, pendedahan cahaya siang, dan kecekapan tenaga sambil mengurangkan pembaziran bahan binaan [2]. Selain itu, pemodelan parametrik berasaskan AI mengoptimumkan geometri yang kompleks, menjadikannya sangat berguna dalam pembinaan bangunan pencakar langit, jambatan, dan perancangan bandar yang mampan [28].

Pengoptimuman reka bentuk berasaskan AI juga meningkatkan pemilihan bahan dan integriti struktur. Model AI boleh menganalisis sifat mekanikal, kesan alam sekitar, dan keberkesanan kos pelbagai bahan binaan untuk mencadangkan pilihan yang paling mampan dan tahan lama [4,29]. Selain itu, simulasi struktur berasaskan AI menilai pengagihan beban, ketahanan terhadap gempa bumi, dan prestasi terma, sekali gus mengurangkan risiko kecacatan reka bentuk serta kegagalan struktur [30]. Dalam projek infrastruktur berskala besar, AI mengoptimumkan penempatan tetulang dalam struktur konkrit, meminimumkan pembaziran bahan sambil meningkatkan kecekapan struktur [31]. Dengan mengintegrasikan AI dalam pengoptimuman reka bentuk, profesional pembinaan dapat mencapai tahap kemampanan, kecekapan, dan ketahanan yang lebih tinggi dalam projek pembinaan moden. Secara keseluruhannya, algoritma pembelajaran mesin digunakan dalam peringkat perancangan awal untuk mengoptimumkan reka bentuk pembinaan, memastikan kecekapan tenaga dan kemampanan sejak peringkat awal projek [3].

3.1.2. Kajian Kebolehlaksanaan Automatik

AI dalam kajian kebolehlaksanaan automatik sedang mengubah proses pembuatan keputusan awal dalam projek pembinaan. Model AI dapat menganalisis pelbagai pemboleh ubah dengan cekap, seperti keadaan tapak, kekangan peraturan, impak alam sekitar, daya maju kewangan, dan keperluan pemegang

kepentingan, untuk menentukan kebolehlaksanaan sesuatu projek. Kajian kebolehlaksanaan tradisional memakan masa dan sering dipengaruhi oleh subjektiviti manusia, manakala alat AI berasaskan analitik data besar dan algoritma pembelajaran mesin menawarkan pandangan objektif yang berasaskan data [14,25]. Alat penilaian kebolehlaksanaan berasaskan AI, seperti pemodelan ramalan dan simulasi Monte Carlo, membantu pengurus pembinaan meramalkan cabaran yang berpotensi serta menilai pelbagai senario sebelum sumber diperuntukkan kepada sesuatu projek [10]. Proses pembuatan keputusan yang dipertingkatkan ini mengurangkan risiko kewangan dan memastikan bahawa hanya projek yang boleh dilaksanakan secara teknikal dan ekonomi diteruskan ke peringkat seterusnya.

Salah satu kelebihan utama kajian kebolehlaksanaan berasaskan AI ialah keupayaannya untuk menyepadukan dan menganalisis data pelbagai sumber daripada projek terdahulu, pemetaan GIS, dan sensor IoT. AI dapat memproses data geospasial, laporan analisis tanah, dan model iklim untuk menilai kesesuaian tapak bagi pembinaan, sambil mengambil kira kekangan alam sekitar [3]. Tambahan pula, simulasi BIM bersepadu AI membolehkan pereka memvisualisasikan dan menguji pelbagai susun atur projek di bawah pelbagai kekangan, sekali gus mengurangkan kerja pembetulan dan mengoptimumkan peruntukan sumber [12]. Kajian kebolehlaksanaan yang dipertingkatkan dengan AI meminimumkan ralat reka bentuk, pembaziran bahan, dan kesan alam sekitar, membawa kepada amalan pembinaan yang lebih mampan.

Di luar kebolehlaksanaan teknikal, AI memainkan peranan penting dalam penilaian kebolehlaksanaan kewangan dan perundangan. Model anggaran kos berkuasa AI menganalisis trend pasaran, kadar inflasi, kos buruh, dan harga bahan mentah untuk menjana unjuran bajet yang tepat [32]. Dengan menilai penunjuk ekonomi dan model pulangan pelaburan (ROI), AI membantu firma pembinaan menentukan daya maju kewangan projek sebelum mendapatkan pembiayaan. Selain itu, AI juga membantu dalam analisis risiko kontrak dengan mengimbas dokumen perundangan dan mengenal pasti potensi isu pematuhan, membantu pemaju menavigasi rangka kerja peraturan yang kompleks dengan lebih cekap [19]. Kajian kebolehlaksanaan berasaskan AI ini meningkatkan perancangan strategik, pengurusan risiko, dan kelestarian kewangan, sekali gus meningkatkan kejayaan jangka panjang projek pembinaan. Alat simulasi dan analisis data berasaskan AI membantu menjalankan kajian kebolehlaksanaan dengan menilai kekangan alam sekitar, struktur, dan kewangan [4,25].

3.2. Peringkat Reka Bentuk

3.2.1. Integrasi Pemodelan Maklumat Bangunan (BIM) & Kecerdasan Buatan (AI)

Integrasi AI dengan BIM merevolusikan industri pembinaan dengan meningkatkan automasi, kecekapan, dan pembuatan keputusan berasaskan data. BIM berfungsi sebagai representasi digital berpusat bagi reka bentuk, pembinaan, dan operasi bangunan, manakala AI memperkasa BIM melalui pengoptimuman reka bentuk automatik, pengesanan pertembungan, dan analitik ramalan [33]. Algoritma AI menganalisis data berskala besar dalam model BIM untuk meramalkan isu integriti struktur, mengoptimumkan penggunaan bahan, dan memastikan pematuhan terhadap piawaian kelestarian [3]. Tambahan pula, platform BIM berasaskan AI menyokong kerjasama masa nyata antara pemegang kepentingan projek, mengurangkan kesilapan dan meningkatkan kecekapan aliran kerja sepanjang kitaran hayat pembinaan.

Salah satu aplikasi utama AI-BIM ialah pemantauan pembinaan automatik dan pengurusan projek. Algoritma penglihatan komputer dan pembelajaran mendalam menilai model BIM secara berterusan untuk mengesan penyimpangan pembinaan, isu kawalan kualiti, dan pelanggaran pematuhan secara masa nyata [33]. Penggunaan sensor IoT dan kembar digital membolehkan AI menjejak kemajuan pembinaan secara langsung, memberikan pandangan ramalan terhadap kelewatan projek, kekurangan sumber, dan keseimbangan keselamatan tapak [20]. Selain itu, model BIM berasaskan AI

mengotomatiskan penjadualan dan peruntukan sumber dengan menganalisis faktor luaran seperti keadaan cuaca, ketersediaan tenaga kerja, dan gangguan rantai bekalan [34]. Kesimpulannya, AI meningkatkan BIM dengan mengotomatiskan pengesanan pertembungan, mengoptimumkan parameter reka bentuk, dan meningkatkan pemeriksaan pematuhan kod [24].

3.2.2. Reka Bentuk Generatif & Pemodelan Parametrik

Integrasi reka bentuk generatif dan pemodelan parametrik dalam pembinaan mengubah cara arkitek dan jurutera mengkonseptualisasikan serta mengoptimumkan struktur. Reka bentuk generatif memanfaatkan algoritma AI untuk meneroka ribuan kemungkinan reka bentuk berdasarkan kekangan yang telah ditetapkan, seperti integriti struktur, kecekapan tenaga, kos bahan, dan kesan alam sekitar [17,33]. Berbeza dengan proses reka bentuk tradisional yang bergantung kepada intervensi manusia secara berulang, AI mempercepatkan penghasilan reka bentuk yang dioptimumkan, mengurangkan masa reka bentuk sambil meningkatkan inovasi. Pemodelan parametrik, pula, membolehkan pengubahsuaian reka bentuk digital secara masa nyata dengan menyesuaikan elemen reka bentuk yang saling bergantung [35]. Kaedah ini sangat berkesan dalam senibina berprestasi tinggi, pembinaan modular, dan sistem bangunan adaptif, di mana fleksibiliti dan kecekapan adalah kritikal.

Aplikasi utama reka bentuk generatif AI adalah dalam pembinaan mampan dan penggunaan bahan secara cekap. Algoritma AI menganalisis penilaian kitaran hayat (LCA), prestasi tenaga, dan metrik jejak karbon untuk menghasilkan reka bentuk yang memaksimumkan pencahayaan semula jadi, mengoptimumkan aliran udara, dan mengurangkan penggunaan tenaga [36]. Sebagai contoh, alat BIM bersepadu dengan reka bentuk generatif boleh menyempurnakan susun atur struktur dengan menilai kecekapan beban galas dan mencadangkan konfigurasi tetulang yang optimum [30]. Dalam pembuatan luar tapak, pemodelan generatif menyokong aliran kerja reka bentuk-ke-fabrikasi secara automatik, memastikan bahawa komponen modular direka dengan pembaziran minimum dan kemudahan pemasangan optimum [10]. Kesimpulannya, alat reka bentuk generatif berasaskan AI menggunakan algoritma untuk meneroka pelbagai alternatif reka bentuk, memilih penyelesaian yang paling cekap dan menjimatkan kos [4].

3.3. Peringkat Pembinaan

3.3.1. Automasi & Robotik

Integrasi automasi dan robotik dalam pembinaan mengubah proses kerja tradisional yang bergantung pada tenaga kerja manual kepada operasi yang lebih efisien, tepat, dan selamat. Robot berasaskan AI semakin banyak digunakan dalam tugas seperti penyusunan batu bata, kimpalan, percetakan 3D, dan pengangkutan bahan, mengurangkan kebergantungan kepada tenaga kerja manual serta meningkatkan kelajuan pembinaan [31]. Pergerakan Construction 4.0 telah mempercepatkan penggunaan automasi robotik dengan memanfaatkan AI, kembar digital, dan sensor IoT untuk mengoptimumkan aliran kerja serta memastikan pemantauan masa nyata terhadap kemajuan pembinaan [3].

Salah satu aplikasi utama automasi robotik dalam pembinaan adalah dalam persekitaran berbahaya dan berisiko tinggi, robot akan mengambil alih tugas berbahaya seperti perobohan, tinjauan tapak, dan kerja dalam keadaan cuaca ekstrem. Lengan robotik berasaskan AI dan dron digunakan untuk pemeriksaan struktur, pemantauan kemajuan, dan tinjauan automatik, membolehkan pengurus pembinaan menilai keadaan projek secara masa nyata tanpa campur tangan manusia [33]. Selain itu, integrasi AI dengan robotik telah memudahkan automasi pintar, membolehkan penyelenggaraan ramalan, peruntukan sumber automatik, dan penghantaran bahan tepat pada masanya melalui algoritma pembelajaran mesin [10]. Kenderaan udara tanpa pemandu (UAV) berasaskan AI digunakan secara

meluas untuk pemantauan tapak, pengimbasan struktur, dan pematuhan keselamatan, meningkatkan penyeliaan projek dan pematuhan peraturan [2].

Di luar aplikasi tapak bina, robotik merevolusikan pembuatan luar tapak dan pembinaan modular. Teknologi percetakan 3D automatik digunakan untuk membina komponen bangunan secara keseluruhan, mengurangkan kos dan mempercepatkan pemasangan dengan pembaziran minimum [10]. Selain itu, fabrikasi digital berasaskan robotik meningkatkan penyeragaman pembinaan, memastikan ketepatan tinggi dalam projek perumahan modular dan infrastruktur. Gabungan AI, robotik, dan automasi sedang membentuk masa depan pembinaan pintar dengan meningkatkan produktiviti, mengurangkan ralat manusia, dan menangani kekurangan tenaga kerja dalam industri. Kesimpulannya, robot berasaskan AI seperti robot penyusun batu bata dan kimpalan mengautomatiskan tugas berulang, meningkatkan produktiviti serta ketepatan, sambil mengurangkan kebergantungan kepada tenaga kerja manual [32].

3.3.2. Pemantauan Tapak Masa Nyata & Pengurusan Keselamatan

Integrasi pemantauan tapak masa nyata dan pengurusan keselamatan berasaskan AI dalam pembinaan telah meningkatkan pengesanan bahaya, keselamatan pekerja, dan pemantauan pematuhan secara ketara. Teknologi AI seperti penglihatan komputer, pembelajaran mesin, dan sensor IoT membolehkan pengawasan berterusan terhadap tapak pembinaan, membantu mengenal pasti risiko, menjejaki tingkah laku pekerja, dan memastikan pematuhan terhadap protokol keselamatan [11]. Sistem pemantauan masa nyata memanfaatkan kamera berkuasa AI, dron, dan peranti boleh pakai untuk mengesan keadaan tidak selamat, seperti penggunaan peralatan perlindungan diri (PPE) yang tidak betul, postur kerja berbahaya, dan keadaan persekitaran yang berisiko. Dengan menggunakan algoritma pembelajaran mendalam dan rangkaian neural konvolusi (CNNs), AI dapat mengklasifikasikan risiko keselamatan dengan tepat, memberi amaran kepada penyelia, dan mencegah kemalangan sebelum berlaku [19].

AI juga merevolusikan pengurusan risiko dalam pembinaan dengan membolehkan analitik keselamatan ramalan melalui pemprosesan data kemalangan terdahulu, keadaan tapak masa nyata, dan corak pergerakan pekerja. Contohnya, model ramalan AI menganalisis keadaan tapak dan tingkah laku pekerja untuk meramalkan kemungkinan kejadian jatuh, kecederaan berkaitan peralatan, dan kegagalan struktur, membolehkan intervensi proaktif [1]. Selain itu, pemantauan masa nyata berasaskan AI meningkatkan latihan pekerja dan pematuhan keselamatan melalui integrasi simulasi realiti maya (VR) dan program latihan keselamatan berasaskan AI. AI membantu penyelia menilai tahap keletihan pekerja, tingkah laku berbahaya, dan risiko persekitaran berdasarkan data masa nyata daripada sensor tapak, penjejakan GPS, dan peranti biometrik [3]. Kesimpulannya, dron, kamera AI, dan sensor IoT digunakan untuk memantau tapak pembinaan bagi mengesan bahaya keselamatan, memastikan pematuhan, dan mengurangkan kemalangan [3].

3.3.3. Pengoptimuman Rantaian Bekalan & Sumber

Integrasi AI dalam rantai bekalan dan pengoptimuman sumber telah merevolusikan perolehan bahan, logistik, dan pengurusan inventori dalam industri pembinaan. Model analitik ramalan berasaskan AI membantu meramalkan permintaan bahan, memastikan penghantaran tepat pada masanya dan mengurangkan pembaziran [1]. Pengurusan rantai bekalan dalam pembinaan sering menghadapi ketidakefisienan, menyebabkan kelewatan, kekurangan bahan, dan lebih kos. Walau bagaimanapun, algoritma AI untuk perancangan logistik dan peruntukan sumber mengurangkan masalah ini dengan menganalisis data sejarah, menjejaki prestasi pembekal, dan mencadangkan strategi perolehan yang paling kos-efektif [37]. Tambahan pula, model pembelajaran mesin mengoptimumkan laluan pengangkutan, mengurangkan jejak karbon dan memastikan amalan rantai bekalan yang mampan [15,25].

Sistem pengurusan sumber berkuasa AI merampingkan aliran kerja pembinaan dengan mengautomasikan penjejakan inventori, pengedaran bahan, dan peruntukan tenaga kerja. Melalui penglihatan komputer dan sensor IoT, AI boleh memantau penggunaan bahan secara masa nyata, mencegah kekurangan, dan mengurangkan kos penyimpanan [3]. Integrasi AI dengan BIM membolehkan penjejakan sumber yang tepat merentas pelbagai projek, meningkatkan kecekapan dan meminimumkan pembaziran. Kesimpulannya, AI meningkatkan logistik dan peruntukan sumber, mengurangkan pembaziran bahan dan memastikan penghantaran tepat pada masanya [1].

3.4. Peringkat Operasi & Penyelenggaraan

3.4.1. Kembar Digital untuk Penyelenggaraan Pintar

Teknologi kembar digital mengubah cara penyelenggaraan dan pengurusan fasiliti dilakukan dalam persekitaran binaan dengan membolehkan pengumpulan data masa nyata, penyelenggaraan ramalan, dan pengoptimuman kitaran hayat. Kembar digital ialah representasi maya aset fizikal yang dikemas kini secara berterusan daripada sensor IoT, analitik berasaskan AI, dan model pembelajaran mesin, mencerminkan keadaan sebenar struktur [38]. Dalam sektor pembinaan dan penyelenggaraan, kembar digital membolehkan pemantauan berterusan sistem bangunan, mengesan anomali dan meramalkan kegagalan sebelum ia berlaku. Pendekatan ini mengurangkan kos penyelenggaraan, meningkatkan kecekapan tenaga, dan memanjangkan jangka hayat aset [39]. Model kembar digital sangat berguna dalam projek infrastruktur kompleks, seperti bangunan pintar, jambatan, dan fasiliti industri, di mana pemantauan masa nyata dan analitik pintar memastikan kecekapan operasi [40].

Kelebihan utama kembar digital berasaskan AI ialah penyelenggaraan ramalan, algoritma AI menganalisis data sensor masa nyata untuk menjangka kegagalan dan mengoptimumkan jadual penyelenggaraan. Contohnya, dalam sistem pemanasan, pengudaraan, dan penyaman udara (HVAC), kembar digital berkuasa AI mengenal pasti ketidakcekapan, mencadangkan pelarasan, dan mencegah gangguan operasi yang tidak dijangka [3]. Tambahan pula, integrasi blockchain dengan kembar digital sedang diterokai untuk perkongsian data yang selamat, memastikan akauntabiliti dan ketelusan dalam pengurusan fasiliti [35]. Model pembelajaran mesin mengesan penyimpangan daripada metrik prestasi normal, membolehkan intervensi proaktif bagi mengelakkan kegagalan peralatan [25]. Kesimpulannya, kembar digital berasaskan AI membolehkan pemantauan masa nyata terhadap bangunan, meramalkan keperluan penyelenggaraan, dan mengoptimumkan pengurusan fasiliti [5].

3.4.2. Pengoptimuman Tenaga Berasaskan AI

AI memainkan peranan transformatif dalam pengoptimuman tenaga dalam pembinaan pintar, membolehkan pengurusan tenaga automatik, pemodelan ramalan penggunaan tenaga, dan kawalan sistem masa nyata. Algoritma pembelajaran mesin (ML) berasaskan AI menganalisis dataset berskala besar daripada bangunan pintar, sistem HVAC, dan peranti IoT untuk mengoptimumkan penggunaan tenaga, sekali gus mengurangkan pembaziran dan kos operasi [25]. Memandangkan bangunan menyumbang hampir 40% daripada penggunaan tenaga global, integrasi AI ke dalam sistem tenaga menjadi penting dalam mencapai sasaran kelestarian dan pelepasan karbon sifar [20]. Model analitik ramalan berasaskan AI membolehkan ramalan permintaan tenaga dinamik, memastikan pelarasan pemanasan, penyejukan, dan pencahayaan yang cekap berdasarkan corak kehadiran penghuni dan faktor persekitaran [11].

Salah satu aplikasi utama AI dalam pengoptimuman tenaga ialah sistem kawalan adaptif masa nyata, yang memantau dan menyesuaikan penggunaan tenaga secara berterusan berdasarkan analitik data sensor. Rangkaian neural tiruan (ANNs) dan kerangka pembelajaran mendalam telah digunakan untuk membangunkan mekanisme kawalan tenaga pintar yang menyesuaikan diri secara autonomi dengan

perubahan keadaan, membawa kepada peningkatan prestasi bangunan [8]. Selain itu, sistem pengesanan dan diagnosis kesalahan (FDD) berasaskan AI memainkan peranan penting dalam mengenal pasti ketidakcekapan dalam peranti yang menggunakan tenaga, mengurangkan perbelanjaan tenaga yang tidak perlu dan kos penyelenggaraan [35]. Kesimpulannya, model AI menganalisis corak penggunaan tenaga untuk mencadangkan strategi pemanasan, penyejukan, dan pengudaraan yang optimum, meningkatkan kecekapan tenaga [3].

3.5. Perobohan & Pengurusan Sisa

3.5.1. Penyisihan Sisa & Kitar Semula Berasaskan AI

AI telah menjadi pemacu utama dalam penyisihan dan kitar semula sisa pembinaan, meningkatkan kecekapan, ketepatan, dan kemampuan dalam industri. Kaedah tradisional pengurusan sisa pembinaan dan perobohan (C&D) sering memerlukan tenaga kerja yang intensif, lambat, dan terdedah kepada kesilapan, menyebabkan kadar pembuangan ke tapak pelupusan yang tinggi serta kemerosotan alam sekitar. Sistem penyisihan sisa berasaskan AI menggunakan penglihatan komputer, robotik, dan pembelajaran mesin untuk mengenal pasti, mengelaskan, dan memisahkan bahan seperti konkrit, kayu, logam, dan plastik daripada aliran sisa C&D [6]. Sistem robotik berasaskan penglihatan kini digunakan untuk mengesan bahan kitar semula secara masa nyata, mengurangkan pencemaran dan meningkatkan kadar kitar semula secara keseluruhan. Selain itu, model pembelajaran mendalam sedang dibangunkan untuk meramalkan corak penjanaan sisa, membolehkan perancangan dan peruntukan sumber yang lebih cekap [37].

Penyisihan sisa berasaskan AI sangat berguna dalam pembinaan prafabrikasi dan modular, di mana bahan lebih seragam dan lebih mudah dikelaskan. Sistem penyisihan automatik yang dilengkapi dengan teknologi pengecaman sensor membantu mengesan komposisi dan kualiti bahan yang dibuang, memastikan bahawa bahan bernilai tinggi dapat diperolehi semula untuk digunakan semula dan tidak dihantar ke tapak pelupusan [37]. Tambahan pula, lengan robotik dan tali sawat berasaskan AI yang dilengkapi dengan spektroskopi inframerah dan pencitraan hiperspektral dapat membezakan jenis bahan dengan tepat serta memisahkannya mengikut kategori yang sesuai. Inovasi ini membantu memaksimumkan kadar pemulihan bahan sambil mengurangkan jejak karbon projek pembinaan. Di luar penyisihan fizikal sisa, AI turut menyumbang kepada logistik sisa pintar dan pengoptimuman dasar kitar semula. Model analitik ramalan AI membantu firma pembinaan meramalkan tahap penjanaan sisa serta mencadangkan kaedah pelupusan atau kitar semula yang paling cekap [2]. Selain itu, kembar digital bagi tapak pembinaan digunakan untuk mensimulasikan aliran sisa, mengenal pasti peluang pengurangan dan penggunaan semula sisa sebelum bahan tersebut memasuki fasa pembinaan [1]. Sistem AI bersepadu dengan blockchain juga sedang diterokai untuk menjejaki pematuhan pengurusan sisa, memastikan bahawa bahan dikitar semula mengikut peraturan alam sekitar. Kesimpulannya, model AI meramalkan bahan yang boleh digunakan semula dan mengoptimumkan proses kitar semula sisa, menyumbang kepada prinsip ekonomi kitaran [6].

3.5.2. Perancangan Perobohan Berorientasikan Kemampuan

Dalam usaha menuju ke arah pembinaan mampan, perancangan perobohan berasaskan AI telah muncul sebagai pendekatan utama untuk mengurangkan kesan alam sekitar dan meningkatkan penggunaan semula bahan. Berbeza dengan kaedah perobohan konvensional, perobohan mampan memanfaatkan AI untuk menilai, mengelaskan, dan mengoptimumkan pemulihan bahan, sekali gus mengurangkan sisa. Algoritma pembelajaran mesin menganalisis BIM, data sensor, dan rekod perobohan terdahulu untuk meramalkan strategi pembongkaran yang paling berkesan, memastikan bahawa bahan bernilai tinggi boleh diperolehi semula untuk kegunaan semula dalam projek masa depan [37].

Robotik berkuasa AI dan automasi juga memainkan peranan penting dalam pembongkaran yang tepat, mengurangkan intervensi manusia dalam persekitaran berbahaya serta meningkatkan kecekapan perobohan. Salah satu komponen utama perancangan perobohan berasaskan AI ialah teknologi kembar digital, yang membolehkan simulasi masa nyata dan analisis senario untuk mengoptimalkan proses perobohan. Model kembar digital mencipta representasi maya bangunan, membolehkan pengurus projek meramalkan risiko struktur, menganggarkan jumlah bahan yang boleh diselamatkan, serta merancang logistik dengan lebih cekap [22]. Tambahan pula, sistem penglihatan AI dan lengan robotik penyisihan bahan membantu mengenal pasti dan mengasingkan bahan kitar semula, seperti konkrit, logam, dan kayu, meningkatkan potensi ekonomi kitaran dalam sektor pembinaan.

Model pembelajaran mendalam yang dilatih dengan dataset yang luas turut meningkatkan ketepatan pengelasan bahan, memastikan bahan yang diperoleh semula memenuhi piawaian industri untuk penggunaan semula. Selain daripada meningkatkan kecekapan, perancangan perobohan berasaskan AI juga menyumbang kepada pematuhan kemampanan dan peraturan alam sekitar. Dengan mengintegrasikan AI dengan teknologi blockchain, firma pembinaan dapat menjejak bahan yang diperoleh semula secara telus, meningkatkan akauntabiliti dan menggalakkan sumber bahan yang lebih beretika [1]. Tambahan pula, model analitik ramalan AI membantu menilai pengurangan jejak karbon, memastikan bahawa aktiviti perobohan selaras dengan kriteria pensijilan bangunan hijau, seperti LEED dan BREEAM. Kesimpulannya, alat AI menilai strategi perobohan untuk meminimumkan kesan alam sekitar dan memaksimumkan pemulihan bahan [2].

4. Perbincangan

AI dalam pembinaan telah mengubah secara signifikan amalan tradisional merentasi pelbagai peringkat projek. Aplikasi AI telah meningkatkan pembuatan keputusan, mengoptimalkan peruntukan sumber, dan meningkatkan kecekapan projek secara keseluruhan. Kajian literatur yang semakin berkembang menunjukkan bahawa alat AI berasaskan pembelajaran mesin, pembelajaran mendalam, dan pembelajaran pengukuhan digunakan secara meluas dalam analitik ramalan, automasi, pemantauan keselamatan, serta inisiatif kemampanan [1]. Keupayaan AI untuk memproses set data berskala besar telah membolehkan peramalan yang lebih tepat, pengesanan risiko awal, dan perancangan projek yang lebih baik, yang sebelum ini mencabar disebabkan oleh sifat proses pembinaan yang berpecah-belah. Tambahan pula, AI yang disepadukan dalam BIM dan Kembar Digital telah membawa kemajuan ketara dalam pembinaan pintar dengan membolehkan simulasi masa nyata dan analitik ramalan. Algoritma reka bentuk berasaskan AI dapat menjana pelbagai iterasi susun atur struktur, menilai setiap pilihan berdasarkan kecekapan, kemampanan, dan keberkesanan kos. Pendekatan ini sangat berguna dalam bangunan hijau berprestasi tinggi, di mana AI menilai faktor seperti kecekapan tenaga, kemampanan bahan, dan prestasi terma [3]. Tambahan pula, integrasi AI dalam BIM meningkatkan kerjasama antara arkitek, jurutera, dan pengurus projek, memastikan bahawa reka bentuk yang dioptimumkan bukan sahaja berfungsi tetapi juga dapat dilaksanakan dengan cekap.

Satu lagi aplikasi kritikal AI dalam pembinaan ialah pemantauan tapak masa nyata dan pengurusan keselamatan. Sistem penglihatan komputer berasaskan AI dan peranti boleh pakai IoT membolehkan pengesanan bahaya secara automatik, mengurangkan kemalangan di tempat kerja dan memastikan pematuhan terhadap peraturan keselamatan [25]. Tambahan pula, robotik dan automasi telah mengambil alih tugas berisiko tinggi, seperti pemeriksaan struktur, pengendalian bahan, dan penggalian, sekali gus meminimumkan pendedahan manusia kepada keadaan berbahaya. Aplikasi ini telah mengurangkan kadar kecederaan dan kematian berkaitan pembinaan secara ketara. AI juga memainkan peranan penting dalam pengoptimuman rantai bekalan dan sumber, memastikan bahawa bahan, tenaga kerja, dan peralatan diperuntukkan dengan cekap untuk meminimumkan pembaziran dan lebihan

kos. Model peramalan permintaan berasaskan AI menganalisis data perolehan sejarah dan trend pasaran untuk menjangka kekurangan bahan, membolehkan pengurusan stok yang lebih proaktif [32]. Selain itu, sistem AI yang disepadukan dengan blockchain memastikan penjejakan bahan yang telus dan cekap, mengurangkan isu penipuan dan ketidakefisienan dalam rantaian bekalan.

Dalam fasa pasca pembinaan, kembar digital berasaskan AI membolehkan strategi penyelenggaraan pintar, memberikan pandangan masa nyata mengenai prestasi bangunan dan jadual penyelenggaraan ramalan. Kembar digital yang digabungkan dengan sensor IoT dan algoritma AI dapat memantau kesihatan struktur, penggunaan tenaga, dan kecekapan sistem HVAC, membolehkan pengurus fasiliti menangani keperluan penyelenggaraan sebelum berlaku kegagalan [5]. Aplikasi ini bukan sahaja meningkatkan jangka hayat aset tetapi juga mengurangkan kos operasi jangka panjang. Pengoptimuman tenaga juga mendapat manfaat daripada kemajuan AI, di mana pemodelan tenaga berasaskan AI dan grid pintar mengoptimumkan prestasi bangunan untuk mengurangkan penggunaan tenaga. Sistem HVAC berkuasa AI menyesuaikan pemanasan dan penyejukan berdasarkan corak kehadiran penghuni, manakala algoritma pembelajaran mesin menganalisis trend penggunaan tenaga untuk mencadangkan penambahbaikan kecekapan [35]. Tambahan pula, integrasi AI dengan sumber tenaga boleh diperbaharui memastikan kecekapan tenaga maksimum, terutamanya dalam bangunan tenaga sifar bersih (NZEBS).

AI juga telah menyumbang secara signifikan kepada usaha kemampanan dalam pembinaan, terutamanya dalam penyisihan sisa berkuasa AI, kitar semula, dan perancangan perobohan mampan. Model pembelajaran mendalam membantu dalam mengenal pasti bahan yang boleh digunakan semula, memastikan bahawa komponen yang boleh dikitar semula diekstrak sebelum perobohan. Tambahan pula, pengelasan bahan berasaskan AI meningkatkan kecekapan penyisihan di loji kitar semula, menyokong prinsip ekonomi kitaran dalam persekitaran binaan [6]. Aplikasi ini mengurangkan sisa tapak pelupusan, mengurangkan pelepasan karbon, dan menyokong amalan pembinaan mesra alam.

5. Kesimpulan

AI dalam pembinaan pintar menawarkan peluang yang besar dalam meningkatkan kecekapan, kemampanan, dan pengurusan projek di pelbagai fasa pembinaan. Melalui kajian ini, didapati bahawa aplikasi AI seperti analitik ramalan, pengoptimuman reka bentuk automatik, pemantauan masa nyata, dan kembar digital memainkan peranan penting dalam mengubah amalan pembinaan tradisional. Alat berasaskan AI telah meningkatkan pembuatan keputusan dengan mengoptimumkan peruntukan sumber, mengurangkan ralat, dan meningkatkan langkah keselamatan di tapak pembinaan. Selain itu, penggunaan automasi dan robotik berasaskan AI telah memperkemas aliran kerja pembinaan, sekali gus meningkatkan produktiviti dan penjimatan kos. Walaupun terdapat kemajuan ini, masih terdapat beberapa cabaran yang menghalang AI daripada direalisasikan sepenuhnya dalam pembinaan pintar. Isu seperti privasi data, interoperabiliti, dan rintangan terhadap perubahan teknologi terus menjadi halangan kepada penggunaan AI secara meluas. Keperluan untuk rangka kerja AI yang piawai serta kolaborasi yang lebih erat antara akademik dan industri telah ditekankan dalam kajian ini. Selain itu, implikasi alam sekitar akibat penggunaan AI juga memerlukan kajian lebih lanjut, terutamanya dalam aspek seperti penggunaan tenaga, pengurusan sisa, dan prinsip ekonomi kitaran. Kajian masa depan perlu menumpukan kepada penyelesaian cabaran ini melalui pembangunan alat AI yang lebih mesra pengguna, peningkatan rangka kerja perkongsian data, dan integrasi AI dengan teknologi pembinaan baharu seperti blockchain dan sistem siber-fizikal. Dengan memanfaatkan inovasi berasaskan AI dan mewujudkan kerjasama merentas disiplin, industri pembinaan boleh mempercepatkan peralihan ke arah pembangunan infrastruktur yang lebih pintar, mampan, dan berdaya tahan.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para pengarang menyatakan bahawa tiada konflik kepentingan dengan mana-mana pihak lain dalam penerbitan karya ini.

ORCID

Terh Jing Khoo  <https://orcid.org/0000-0002-6442-1301>

Chin Yee Ha  <https://orcid.org/0000-0003-3234-0571>

Rujukan

- [1] S.O. Abioye, L.O. Oyedele, L. Akanbi, A. Ajayi, J.M. Davila Delgado, M. Bilal, O.O. Akinade, and A. Ahmed, Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Review of Present Status, Opportunities and Future Challenges, *Journal of Building Engineering* 44 (2021) 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>.
- [2] M. Regona, T. Yigitcanlar, B. Xia, and R.Y.M. Li, Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 8 (2022) 45. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010045>.
- [3] M. Baghalzadeh Shishehgarkhaneh, A. Keivani, R.C. Moehler, N. Jelodari, and S. Roshdi Laleh, Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis, *Buildings* 12 (2022) 1503. <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>.
- [4] M.-A. Vigneault, C. Botton, H.-Y. Chong, and B. Cooper-Cooke, An Innovative Framework of 5D BIM Solutions for Construction Cost Management: A Systematic Review, *Archives of Computational Methods in Engineering* 27 (2020) 1013-1030. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09341-z>.
- [5] J.M. Davila Delgado, and L. Oyedele, Digital Twins for the Built Environment: Learning from Conceptual and Process Models in Manufacturing, *Advanced Engineering Informatics* 49 (2021) 101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>.
- [6] L.A. Akanbi, A.O. Oyedele, L.O. Oyedele, and R.O. Salami, Deep Learning Model for Demolition Waste Prediction in a Circular Economy, *Journal of Cleaner Production* 274 (2020) 122843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122843>.
- [7] C. Mocerino, Digital Revolution in Efficient Self-Organization of Buildings: Towards Intelligent Robotics, *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, 2018, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ES2DE.2018.8494237>.
- [8] S. Agostinelli, F. Cumo, G. Guidi, and C. Tomazzoli, Cyber-Physical Systems Improving Building Energy Management: Digital Twin and Artificial Intelligence, *Energies* 14 (2021) 2338. <https://doi.org/10.3390/en14082338>.
- [9] M. Afzal, R.Y.M. Li, M. Shoaib, M.F. Ayyub, L.C. Tagliabue, M. Bilal, H. Ghafoor, and O. Manta, Delving into the Digital Twin Developments and Applications in the Construction Industry: A PRISMA Approach, *Sustainability* 15 (2023) 16436. <https://doi.org/10.3390/su152316436>.
- [10] A.J. Sánchez-Garrido, I.J. Navarro, J. García, V. Yepes, A Systematic Literature Review on Modern Methods of Construction in Building: An Integrated Approach using Machine Learning, *Journal of Building Engineering* 73 (2023) 106725. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106725>.
- [11] L. Zhang, Y. Li, Y. Pan, and L. Ding, Advanced Informatic Technologies for Intelligent Construction: A Review, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 137 (2024) 109104. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109104>.

- [12] Z. Liu, Y. He, P. Demian, and M. Osmani, Immersive Technology and Building Information Modeling (BIM) for Sustainable Smart Cities, *Buildings* 14 (2024) 1765. <https://doi.org/10.3390/buildings14061765>.
- [13] B.C. Weber-Lewerenz, M. Traverso, Best Practices in Construction 4.0 – Catalysts of digital innovations (Part I), *Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research* (2023).
- [14] A.F. Kineber, N. Elshaboury, A.E. Oke, J. Aliu, Z. Abunada, and M. Alhusban, Revolutionizing Construction: A Cutting-Edge Decision-Making Model for Artificial Intelligence Implementation in Sustainable Building Projects, *Heliyon* 10 (2024) e37078. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37078>.
- [15] S.K. Yevu, E.K. Owusu, A.P.C. Chan, S.M.E. Sepasgozar, and V.R. Kamat, Digital Twin-Enabled Prefabrication Supply Chain for Smart Construction and Carbon Emissions Evaluation in Building Projects, *Journal of Building Engineering* 78 (2023) 107598. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107598>.
- [16] O. Sánchez, K. Castañeda, S. Vidal-Méndez, D. Carrasco-Beltrán, and N.E. Lozano-Ramírez, Exploring the Influence of Linear Infrastructure Projects 4.0 Technologies to Promote Sustainable Development in Smart Cities, *Results in Engineering* 23 (2024) 102824. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102824>.
- [17] M. Regona, T. Yigitcanlar, C.K.H. Hon, and M. Teo, Mapping Two Decades of AI in Construction Research: A Scientometric Analysis from the Sustainability and Construction Phases Lenses, *Buildings* 13 (2023) 2346. <https://doi.org/10.3390/buildings13092346>.
- [18] J. de Almeida Barbosa Franco, A.M. Domingues, N. de Almeida Africano, R.M. Deus, and R.A.G. Battistelle, Sustainability in the Civil Construction Sector Supported by Industry 4.0 Technologies: Challenges and Opportunities, *Infrastructures* 7 (2022) 43. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030043>.
- [19] H. Shafei, R.A. Rahman, and Y.S. Lee, Construction 4.0 Technology Evaluation using Fuzzy TOPSIS: Comparison between Sustainability and Resiliency, Well-being, Productivity, Safety, and Integrity, *Environmental Science and Pollution Research* 31 (2024) 14858-14893. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31862-9>.
- [20] H. Aladağ, İ. Güven, and O. Balli, Contribution of Artificial Intelligence (AI) to Construction Project Management Processes: State of the Art with Scoping Review Method, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences* 42 (2024) 1654-1669.
- [21] J. Zhang, X. Zhu, A.M. Khan, M. Houda, S. Kashif Ur Rehman, M. Jameel, M.F. Javed, and R. Alrowais, BIM-based Architectural Analysis and Optimization for Construction 4.0 Concept (A Comparison), *Ain Shams Engineering Journal* 14 (2023) 102110. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102110>.
- [22] Y. Jiang, S. Su, S. Zhao, R.Y. Zhong, W. Qiu, M.J. Skibniewski, I. Brilakis, and G.Q. Huang, Digital Twin-Enabled Synchronized Construction Management: A Roadmap from Construction 4.0 towards Future Prospect, *Developments in the Built Environment* 19 (2024) 100512. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100512>.
- [23] G. Qiang, S. Tang, J. Hao, and L.D. Sarno, A BIM and AIoT Integration Framework for Improving Energy Efficiency in Green Buildings, *Construction Research Congress 2024*, 2024, pp. 577-585. <https://doi.org/10.1061/9780784485262.059>.
- [24] R. Sacks, M. Girolami, and I. Brilakis, Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech, *Developments in the Built Environment* 4 (2020) 100011. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>.
- [25] Y. Xu, Y. Zhou, P. Sekula, and L. Ding, Machine Learning in Construction: From Shallow to Deep Learning, *Developments in the Built Environment* 6 (2021) 100045. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100045>.
- [26] N. Rane, Role of ChatGPT and Similar Generative Artificial Intelligence (AI) in Construction Industry, Available at SSRN 4598258 (2023).
- [27] R. Panchalingam, and K.C. Chan, A State-of-the-art Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings, *Intelligent Buildings International* 13 (2021) 203-226. <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1613219>.

- [28] T.D. Akinosho, L.O. Oyedele, M. Bilal, A.O. Ajayi, M.D. Delgado, O.O. Akinade, and A.A. Ahmed, Deep Learning in the Construction Industry: A Review of Present Status and Future Innovations, *Journal of Building Engineering* 32 (2020) 101827. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101827>.
- [29] S.A. Bello, L.O. Oyedele, O.O. Akinade, M. Bilal, J.M. Davila Delgado, L.A. Akanbi, A.O. Ajayi, and H.A. Owolabi, Cloud Computing in Construction Industry: Use Cases, Benefits and Challenges, *Automation in Construction* 122 (2021) 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>.
- [30] B. Manzoor, I. Othman, S. Durdyev, S. Ismail, and M.H. Wahab, Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development—A Systematic Literature Review, *Applied System Innovation* 4 (2021) 52. <https://doi.org/10.3390/asi4030052>.
- [31] A.A. Khan, A.O. Bello, M. Arqam, and F. Ullah, Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies, *Technologies* 12 (2024) 185. <https://doi.org/10.3390/technologies12100185>.
- [32] I. Taboada, A. Daneshpajouh, N. Toledo, and T. de Vass, Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review, *Applied Sciences* 13 (2023) 5014. <https://doi.org/10.3390/app13085014>.
- [33] F. Zhang, A.P.C. Chan, A. Darko, Z. Chen, and D. Li, Integrated Applications of Building Information Modeling and Artificial Intelligence Techniques in the AEC/FM Industry, *Automation in Construction* 139 (2022) 104289. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104289>.
- [34] A. Banerjee, and R.R. Nayaka, A Comprehensive Overview on BIM-integrated Cyber Physical System Architectures and Practices in the Architecture, Engineering and Construction Industry, *Construction Innovation* 22 (2022) 727-748. <https://doi.org/10.1108/CI-02-2021-0029>.
- [35] D.D. Eneyew, M.A.M. Capretz, and G.T. Bitsuamlak, Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration, *IEEE Access* 10 (2022) 130487-130506. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229370>.
- [36] Z. Fan, Z. Yan, and S. Wen, Deep Learning and Artificial Intelligence in Sustainability: A Review of SDGs, Renewable Energy, and Environmental Health, *Sustainability* 15 (2023) 13493. <https://doi.org/10.3390/su151813493>.
- [37] B.I. Oluleye, D.W.M. Chan, and P. Antwi-Afari, Adopting Artificial Intelligence for Enhancing the Implementation of Systemic Circularity in the Construction Industry: A Critical Review, *Sustainable Production and Consumption* 35 (2023) 509-524. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.002>.
- [38] D.-G.J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, M. Rashidi, T. Famakinwa, and K. Bamdad, Drivers for Digital Twin Adoption in the Construction Industry: A Systematic Literature Review, *Buildings* 12 (2022) 113. <https://doi.org/10.3390/buildings12020113>.
- [39] P. Méda, D. Calvetti, E. Hjelseth, and H. Sousa, Incremental Digital Twin Conceptualisations Targeting Data-Driven Circular Construction, *Buildings* 11 (2021) 554. <https://doi.org/10.3390/buildings11110554>.
- [40] A.A. Akanmu, C.J. Anumba, and O.O. Ogunseiju, Towards Next Generation Cyber-Physical Systems and Digital Twins for Construction, *Journal of Information Technology in Construction* 26 (2021). <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.027>.