

Pemanfaatan Kecerdasan Buatan (AI) dalam Konstruksi Modular dan Prefabrikasi

Nazaruddin Khuluk^{1*}; LMF. Purwanto²

1. Mahasiswa Program Studi Doktor Arsitektur Konsentrasi Arsitektur Digital Unika Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Bendan Duwur, Kec. Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50234, Indonesia
2. Program Studi Doktor Arsitektur Konsentrasi Arsitektur Digital Unika Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Bendan Duwur, Kec. Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50234, Indonesia

^{*)}Email: nazaruddin.khuluk@unkris.ac.id

Received: 22 Mei 2025 | Accepted: 11 Juni 2025 | Published: 17 Oktober 2025

ABSTRACT

The application of Artificial Intelligence (AI) in modular and prefabricated construction offers an innovative solution to enhance efficiency, quality, and safety in the construction industry. This approach enables automation of design, production, and project management processes in real-time, thereby accelerating construction time while minimizing the risks of errors and material waste. The integration of AI with software such as Tekla Structures and Robot Structural Analysis strengthens the accuracy of modeling and structural analysis, while robotics support increases productivity and workplace safety by automating high-risk physical tasks. Furthermore, AI-based prefabrication design optimization and cross-team collaboration through platforms like Bluebeam provide greater flexibility and coordination in project execution. Despite its numerous benefits, the implementation of these technologies faces challenges including high investment costs, the need for skilled human resources, and regulatory adaptation, which must be addressed to ensure an effective and sustainable transformation of the construction industry..

Keywords: Artificial Intelligence; Modular Construction; Prefabrication; Robotics; Design Optimization

ABSTRAK

Penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam konstruksi modular dan prefabrikasi menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi, kualitas, dan keselamatan dalam industri konstruksi. Metode ini memungkinkan otomatisasi proses desain, produksi, dan manajemen proyek secara real-time sehingga mempercepat waktu konstruksi sekaligus meminimalkan risiko kesalahan dan pemborosan material. Integrasi AI dengan perangkat lunak seperti Tekla Structures dan Robot Structural Analysis memperkuat akurasi pemodelan dan analisis struktural, sedangkan dukungan robotika meningkatkan produktivitas dan keselamatan kerja dengan mengotomasi tugas fisik yang berisiko tinggi. Selain itu, optimalisasi desain prefabrikasi berbasis AI serta kolaborasi lintas tim melalui platform Bluebeam memberikan fleksibilitas dan koordinasi yang lebih baik dalam pelaksanaan proyek. Meskipun memiliki banyak manfaat, implementasi teknologi ini menghadapi tantangan berupa biaya investasi tinggi, kebutuhan sumber daya manusia terampil, dan adaptasi regulasi yang perlu diatasi agar transformasi industri konstruksi dapat berjalan efektif dan berkelanjutan..

Kata kunci: Kecerdasan Buatan; Konstruksi Modular; Prefabrikasi; Robotika; Optimalisasi Desain

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi bangunan merupakan salah satu sektor yang memiliki peran penting dalam pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi nasional. Sektor ini menghadapi berbagai tantangan yang kompleks, seperti rendahnya produktivitas, tingginya risiko kecelakaan kerja, dan pemborosan sumber daya yang masih signifikan dalam praktik konstruksi konvensional[1]. Metode konstruksi tradisional yang bersifat onsite sering kali menghadapi keterbatasan dalam pengendalian kualitas, efisiensi waktu, serta biaya produksi yang cenderung meningkat seiring dengan kompleksitas proyek. Oleh karena itu, diperlukan inovasi teknologi yang dapat mengatasi kendala tersebut sekaligus meningkatkan kualitas dan produktivitas proses konstruksi.

Konstruksi modular dan prefabrikasi muncul sebagai solusi alternatif yang semakin mendapat perhatian di berbagai negara. Metode ini memungkinkan produksi elemen bangunan dilakukan secara terkontrol di pabrik dengan kondisi yang stabil dan standar mutu yang tinggi, kemudian dirakit di lokasi proyek sehingga mengurangi durasi pekerjaan di lapangan. Pendekatan ini terbukti mampu memangkas waktu konstruksi secara signifikan dan menurunkan risiko kesalahan konstruksi yang sering terjadi pada proses di lapangan. Penggunaan konstruksi modular juga memungkinkan fleksibilitas desain dan perbaikan kualitas secara berkelanjutan melalui proses produksi yang terstandarisasi.

Seiring dengan kemajuan teknologi digital, penerapan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dan robotika mulai merambah ke industri konstruksi sebagai alat bantu untuk mengatasi kendala tersebut. AI mampu meningkatkan efisiensi di berbagai tahap proses konstruksi, mulai dari desain generatif yang memanfaatkan algoritma untuk menghasilkan alternatif desain optimal berdasarkan berbagai parameter teknis dan lingkungan, hingga pengendalian kualitas produksi secara real-time menggunakan sensor dan analisis data besar (Baghdadi, Heristchian, & Klo, 2020; Barjuei et al., 2024). Teknologi robotika juga berperan penting dalam mengotomasi tugas-tugas fisik yang berisiko tinggi bagi tenaga kerja manusia, seperti pengangkatan material berat, pengecoran, dan inspeksi struktur, sehingga dapat meningkatkan keselamatan kerja dan mengurangi angka kecelakaan[2].

Integrasi AI dan robotika dalam konstruksi modular dan prefabrikasi tidak hanya mendorong peningkatan produktivitas dan kualitas, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan. Penggunaan teknologi ini membantu mengurangi pemborosan material dan limbah konstruksi, serta mengoptimalkan penggunaan energi selama proses produksi dan pemasangan elemen bangunan[3]. Hal ini sejalan dengan upaya global dalam mengembangkan industri konstruksi yang ramah lingkungan dan mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Selain itu, digitalisasi dan otomatisasi dengan dukungan AI juga membuka peluang bagi munculnya ekosistem konstruksi yang lebih cerdas dan terintegrasi, termasuk dalam konteks smart cities dan urbanisasi masa depan.

Meskipun potensi AI dan robotika sangat besar, implementasi teknologi ini juga menghadapi sejumlah tantangan yang tidak bisa diabaikan. Investasi awal yang cukup besar, kebutuhan sumber daya manusia yang terampil, adaptasi regulasi dan standar industri, serta resistensi budaya terhadap perubahan teknologi menjadi faktor penghambat yang harus diatasi secara sistematis[4]. Oleh karena itu, penelitian dan kajian mendalam terkait integrasi AI dalam konstruksi modular dan prefabrikasi menjadi sangat penting untuk mendukung transformasi industri ini ke arah yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode studi pustaka untuk menganalisis penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam konstruksi modular dan prefabrikasi. Data diperoleh dari jurnal ilmiah dan publikasi akademik yang relevan dengan topik tersebut. Pengumpulan data dilakukan melalui pencarian sumber terpercaya menggunakan kata kunci terkait, kemudian artikel yang sesuai dianalisis secara deskriptif untuk merangkum konsep, manfaat, dan tantangan penerapan AI. Analisis difokuskan pada aplikasi AI di bidang konstruksi modular dan prefabrikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Peran Kecerdasan Buatan dalam Konstruksi Modular dan Prefabrikasi

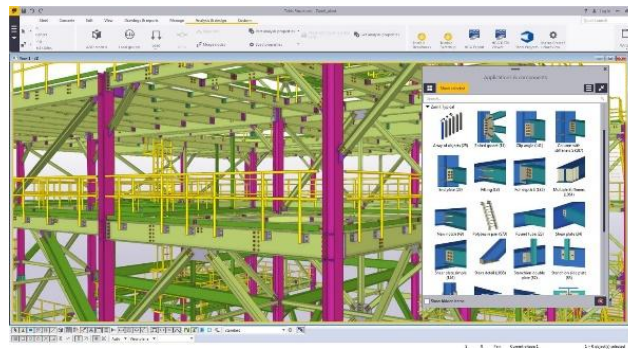
Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI) telah menjadi inovasi kunci dalam merombak paradigma industri konstruksi, terutama pada metode konstruksi modular dan prefabrikasi yang kian meluas penerapannya di berbagai belahan dunia. Penerapan AI membawa peningkatan signifikan dalam efisiensi operasional dengan mengotomatisasi proses desain, produksi, dan manajemen proyek. AI mampu memproses data besar dari berbagai sumber secara real-time, termasuk data sensor, parameter desain, dan jadwal produksi, sehingga dapat memberikan prediksi dan rekomendasi yang memperkecil risiko kegagalan dan pemborosan. Misalnya, algoritma pembelajaran mesin dapat mengidentifikasi pola cacat dalam proses produksi elemen modular dan memberikan peringatan dini untuk tindakan korektif, sehingga meningkatkan kualitas produk dan menekan biaya perbaikan [1][7].

Dalam sebuah proses desain, AI mendukung metode desain generatif yang memungkinkan penciptaan alternatif desain optimal berdasarkan banyak parameter, seperti kekuatan material, biaya, efisiensi penggunaan bahan, dan aspek keberlanjutan lingkungan. Dengan kemampuan eksplorasi lebih cepat dari berbagai pilihan desain ini, AI mempercepat waktu siklus alur desain hingga berbulan-bulan lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional. Desain yang dihasilkan juga lebih inovatif dan adaptif terhadap perubahan kebutuhan proyek, sehingga mendukung fleksibilitas dalam produksi massal dan pemasangan di lapangan[5]. AI juga memperkuat kolaborasi antar tim desain dan produksi melalui platform digital yang memungkinkan update data dan kontrol kualitas secara terintegrasi.

3.2. Tekla Structures Untuk Pemodelan Bangunan Modular

Tekla Structures merupakan software *Building Information Modeling* (BIM) yang populer dan sangat efektif untuk mendukung proses desain dan konstruksi modular serta prefabrikasi. Software ini memungkinkan pemodelan tiga dimensi secara rinci dengan akurasi tinggi, termasuk detail elemen struktural baja, beton, dan komponen prefabrikasi lain. Fitur utama Tekla mencakup pembuatan model detail, clash detection untuk mendeteksi potensi benturan antar elemen, dan kemampuan menghasilkan dokumen produksi dan instalasi secara otomatis. Hal ini sangat membantu dalam mengurangi kesalahan manufaktur dan pemasangan di lapangan, sehingga mempercepat siklus proyek

Contoh penggunaan Tekla Structures dapat dilihat pada proyek pembangunan gedung modular. Pada proyek ini, model 3D dibuat secara terperinci untuk seluruh komponen struktural, kemudian model tersebut dikoneksikan dengan mesin produksi pabrik prefabrikasi. Dengan dukungan Tekla, proses pemotongan baja dan pembuatan elemen beton pracetak dapat berjalan otomatis dengan presisi tinggi sehingga waktu produksi dipangkas dan kesalahan produksi dapat menurun cukup signifikan yang berdampak positif pada percepatan pemasangan di lapangan [1].



Gambar 1. Tekla Structures Untuk Pemodelan Bangunan Modular

Sumber: <https://zamilconsulting.com/membuat-struktur-gedung-menggunakan-tekla/>

Tekla juga memungkinkan integrasi dengan software lain seperti ERP dan sistem manajemen proyek yang memudahkan koordinasi lintas divisi serta pengawasan progres secara real-time. Melalui fitur cloud collaboration, berbagai pemangku kepentingan dapat mengakses model dan update terbaru secara simultan dari berbagai lokasi, yang secara efektif mengurangi miskomunikasi dan potensi kesalahan akibat data usang [11].

Dengan kemampuan tersebut, Tekla Structures menjadi salah satu fondasi digital utama yang mendukung penerapan AI dalam konstruksi modular dan prefabrikasi. Software ini tidak hanya meningkatkan efisiensi desain dan produksi, tetapi juga memperkuat sinergi antara teknologi digital dengan proses fisik di lapangan, membuka peluang untuk inovasi berkelanjutan di sektor konstruksi.

3.3. Penggunaan Robotika sebagai Pendukung AI

Peran robotika dalam mendukung kecerdasan buatan (AI) pada industri konstruksi modular dan prefabrikasi semakin vital seiring dengan kebutuhan akan peningkatan produktivitas, keselamatan kerja, dan efisiensi operasional. Robotika memungkinkan otomasi tugas-tugas yang bersifat fisik, berulang, dan berisiko tinggi, yang jika dikerjakan secara manual akan sangat rentan terhadap kesalahan dan cedera. Dengan kemampuan sensorik dan algoritma AI yang canggih, robot dapat melakukan aktivitas seperti pengangkatan dan pemasangan elemen modular, pengecoran beton, pemotongan material, dan inspeksi kualitas dengan presisi tinggi dan konsistensi yang tidak bisa dicapai manusia. Penerapan robot dalam proyek konstruksi modular tidak hanya mempercepat proses pembangunan, tetapi juga mengurangi risiko kecelakaan kerja yang secara historis menjadi salah satu masalah utama industri konstruksi [12][9].

Penerapan robotika dengan dukungan AI memungkinkan adaptasi sistem kerja yang lebih responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan lapangan. Robot dilengkapi sistem navigasi otonom dan pengolahan data secara real-time sehingga dapat menyesuaikan gerakan dan fungsi sesuai kebutuhan di lokasi proyek. Misalnya, robot pengangkut material modular dapat secara otomatis menghindari rintangan dan mengatur rute terbaik ke lokasi pemasangan. Dalam konteks prefabrikasi, robotika membantu mempercepat dan meningkatkan akurasi pemasangan komponen, yang sebelumnya sangat bergantung pada keahlian dan ketelitian tenaga manusia. Dengan robot yang beroperasi secara otomatis dan konsisten, risiko kegagalan pemasangan akibat kesalahan manusia dapat diminimalkan, sehingga proyek dapat berjalan sesuai jadwal dan anggaran [13].

Pada perkembangannya juga robotika mendukung aktivitas inspeksi dan pemeliharaan pasca konstruksi. Robot-robot otonom dengan dilengkapi sensor canggih mampu melakukan pemantauan struktural dan mendeteksi kerusakan secara dini, ini sangat membantu dalam menjaga kualitas dan

keamanan bangunan modular jangka panjang. Hal ini memungkinkan perbaikan dilakukan sebelum masalah menjadi lebih serius, sekaligus mengurangi biaya dan waktu yang biasanya diperlukan inspeksi manual. Dalam jangka panjang, integrasi robotika dan AI mendorong terciptanya ekosistem konstruksi yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan minim risiko [14].

Seiring berjalannya waktu implementasi robotika di lapangan juga menghadapi tantangan signifikan. Biaya investasi awal yang tinggi dan kebutuhan pelatihan tenaga kerja menjadi hambatan utama, terutama di negara berkembang. Selain itu, integrasi sistem robotika dengan infrastruktur proyek yang sudah ada memerlukan adaptasi dan pengembangan teknologi yang berkelanjutan. Oleh karena itu, kolaborasi antara pengembang teknologi, akademisi, industri konstruksi, dan pemerintah sangat penting untuk memastikan pemanfaatan robotika berjalan optimal dan berkelanjutan [15].

3.4. Robot Structural Analysis – Untuk Analisis Struktural

Robot Structural Analysis adalah perangkat lunak terkemuka yang digunakan untuk melakukan analisis dan desain struktur bangunan secara menyeluruh. Software ini memberikan kemampuan simulasi beban statis dan dinamis, analisis gempa, angin, dan beban lain yang kompleks pada struktur modular dan prefabrikasi. Dengan menggunakan algoritma pemodelan yang maju dan kemampuan AI untuk mempercepat proses perhitungan, Robot Structural Analysis membantu insinyur struktural dalam mendesain sistem yang aman, efisien, dan optimal.

Dalam konteks konstruksi modular, perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan dan simulasi komponen modular secara detail, sehingga potensi kelemahan struktur dapat teridentifikasi sejak tahap desain. Misalnya, sambungan antar elemen baja atau beton pracetak yang dirancang dengan memanfaatkan *Robot Structural Analysis* akan diuji performanya terhadap beban gempa dan angin, menjamin integritas struktur setelah pemasangan. Fitur optimasi desain membantu mengurangi penggunaan material berlebih tanpa mengorbankan kekuatan bangunan, yang berarti proyek dapat menjadi lebih hemat biaya sekaligus ramah lingkungan.

Contoh nyata penggunaan *Robot Structural Analysis* dapat dilihat pada proyek gedung modular bertingkat, di mana perangkat lunak ini dipakai untuk memastikan sambungan dan elemen struktur memenuhi standar keselamatan gempa internasional. Pendekatan ini mempercepat waktu desain sekaligus menurunkan biaya material karena penggunaan material yang lebih efisien dan minim revisi desain di lapangan. Integrasi data dari sistem BIM seperti Tekla Structures juga memungkinkan kolaborasi lintas disiplin yang lebih efektif, mempercepat validasi teknis dan persetujuan desain.

Robot Structural Analysis menyediakan fitur laporan otomatis yang membantu dokumentasi teknis dalam proses audit dan perizinan proyek. Hal ini sangat mendukung kebutuhan proyek modular yang menuntut transparansi dan standar kualitas tinggi di setiap tahapnya. Dengan demikian, perangkat lunak ini menjadi bagian integral dalam ekosistem digital konstruksi modern, mendukung penerapan robotika dan AI yang semakin meluas dalam industri konstruksi modular dan prefabrikasi.

3.5. Optimalisasi Desain Prefabrikasi Berbasis AI

Optimalisasi desain prefabrikasi melalui pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) merupakan langkah strategis yang semakin krusial dalam mendukung efisiensi dan kualitas proyek konstruksi modular. AI memungkinkan pemrosesan data desain dalam skala besar yang melibatkan berbagai variabel teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan. Dengan algoritma pembelajaran mesin dan metode optimasi metaheuristik, AI mampu menghasilkan alternatif desain prefabrikasi yang

tidak hanya memenuhi standar teknis tetapi juga meminimalkan pemborosan material dan biaya produksi. Pendekatan ini mempercepat proses iterasi desain yang pada metode konvensional biasanya memerlukan waktu lama dan sumber daya yang besar. Hasilnya, desain yang optimal dapat ditemukan lebih cepat, memberikan nilai tambah berupa efisiensi biaya dan waktu konstruksi, serta mendukung keberlanjutan proyek [6].

Selain itu, AI dalam desain prefabrikasi juga memungkinkan penyesuaian desain secara fleksibel sesuai kebutuhan pengguna atau kondisi lapangan yang berubah-ubah. Kemampuan AI dalam melakukan simulasi dan evaluasi multi-skenario memungkinkan desainer untuk mengeksplorasi berbagai alternatif solusi desain secara cepat dan akurat. Hal ini sangat penting dalam proyek modular yang mensyaratkan desain yang mudah disesuaikan dan dikustomisasi tanpa mengorbankan efisiensi produksi massal. Dengan demikian, AI membuka peluang bagi pendekatan desain yang lebih adaptif dan responsif, yang mampu mengakomodasi kebutuhan klien serta tuntutan teknis secara bersamaan [5].

Implementasi AI juga mendukung integrasi data dari berbagai disiplin ilmu, seperti arsitektur, teknik sipil, dan mekanikal-elektrikal, ke dalam satu model desain terpadu. Integrasi ini membantu mengurangi potensi kesalahan koordinasi dan konflik antar elemen desain yang sering terjadi pada metode konvensional. Melalui model digital yang kaya informasi, proses produksi prefabrikasi dapat dilaksanakan dengan tingkat presisi tinggi, sehingga mengurangi risiko kesalahan manufaktur dan mempercepat waktu pemasangan di lapangan. Secara keseluruhan, optimalisasi desain prefabrikasi berbasis AI menjadi fondasi utama dalam mewujudkan konstruksi modular yang efisien, berkualitas, dan berkelanjutan [3].

3.6. Bluebeam Untuk Kolaborasi Proyek Konstruksi

Bluebeam adalah perangkat lunak yang berfungsi sebagai platform kolaborasi proyek konstruksi yang memungkinkan komunikasi dan koordinasi lintas tim desain, manajemen, dan pelaksana di lapangan secara real-time. Dalam konteks optimalisasi desain prefabrikasi, Bluebeam memfasilitasi kolaborasi antar pemangku kepentingan dengan menyediakan fitur markup, pengeditan dokumen PDF teknis, dan manajemen dokumen yang terintegrasi. Hal ini mempercepat proses review desain dan memperkecil risiko miskomunikasi yang dapat menyebabkan kesalahan produksi atau keterlambatan.

Penggunaan Bluebeam memungkinkan tim desain dan kontraktor untuk bekerja pada dokumen yang sama secara simultan, mengamati perubahan secara langsung, dan memberikan umpan balik yang jelas dan terdokumentasi. Misalnya, dalam proyek prefabrikasi, tim arsitek dapat memberikan catatan perbaikan desain kepada tim produksi secara langsung pada dokumen desain digital tanpa perlu bertemu fisik. Fitur ini sangat bermanfaat dalam mengelola proyek modular yang melibatkan banyak elemen dan pihak terkait, sehingga mengoptimalkan siklus komunikasi dan mempercepat pengambilan keputusan.



Gambar 2. Bluebeam Untuk Kolaborasi Proyek Konstruksi

Sumber: <https://pccadla.com/software/bluebeam-revu/>

Bluebeam juga membantu mengurangi kesalahan interpretasi desain yang biasa terjadi pada dokumen cetak tradisional, sehingga tingkat kesalahan produksi menurun secara signifikan. Penggunaan teknologi ini mendukung pengelolaan dokumen digital yang efisien, transparan, dan akuntabel sepanjang siklus proyek [16]. Bluebeam juga dapat diintegrasikan dengan perangkat lunak BIM dan manajemen proyek lain sehingga memudahkan pengelolaan proyek secara menyeluruh. Dengan dukungan cloud, Bluebeam memungkinkan akses dokumen dan kolaborasi dari berbagai lokasi, mendukung fleksibilitas kerja terutama dalam situasi pembatasan sosial seperti pandemi. Keunggulan ini membuat Bluebeam menjadi alat penting dalam mendukung optimalisasi desain prefabrikasi berbasis AI dengan komunikasi lintas disiplin yang efisien dan efektif [17].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam konstruksi modular dan prefabrikasi telah terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan efisiensi, kualitas, dan keselamatan dalam industri konstruksi. AI memungkinkan otomatisasi berbagai proses mulai dari desain generatif, produksi elemen modular, hingga manajemen proyek secara real-time, sehingga mempercepat siklus konstruksi dan meminimalkan risiko kesalahan serta pemborosan material. Integrasi AI dengan perangkat lunak pendukung seperti Tekla Structures dan Robot Structural Analysis memperkuat presisi desain dan analisis struktural, sementara robotika sebagai pelengkap AI mengotomasi tugas fisik berisiko tinggi, meningkatkan keselamatan kerja, serta konsistensi produksi dan pemasangan. Optimalisasi desain prefabrikasi berbasis AI juga membuka peluang untuk desain yang lebih adaptif dan efisien, serta mendukung kolaborasi proyek melalui platform seperti Bluebeam yang memfasilitasi komunikasi lintas tim secara efektif dan terintegrasi. Meskipun demikian, tantangan seperti biaya investasi awal yang tinggi, kebutuhan sumber daya manusia terampil, dan adaptasi regulasi masih perlu ditangani secara sistematis untuk mendukung transformasi industri konstruksi ke arah yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan produktif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Instansi/perusahaan/lembaga yang telah memberi dukungan yang membantu pelaksanaan penelitian dan atau penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. A. Fitriyanto and A. F. Zakariya, "Evolusi Peran Arsitek di Era Artificial Intelligence dan Teknologi Berbasis Data," *J. Arsit. TERRACOTTA*, vol. 5, no. 1, pp. 23–29, 2023, doi: 10.26760/terracotta.v5i1.10619.
- [2] J. S. Park, D. G. Lee, J. A. Jimenez, S. J. Lee, and J. W. Kim, "Human-Focused Digital Twin Applications for Occupational Safety and Health in Workplaces: A Brief Survey and Research Directions," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/app13074598.
- [3] L. Chen, C. Zhai, L. Wang, X. Hu, and X. Huang, "Modular Structure Construction Progress Scenario: A Case Study of an Emergency Hospital to Address the COVID-19 Pandemic," *Sustain.*, vol. 14, no. 18, 2022, doi: 10.3390/su141811243.
- [4] A. F. Furmanek, "Basic reflections on the implementation of different 3D technologies co-operating in the architectural design process," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1203, no. 3, p. 032137, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1203/3/032137.
- [5] S. H. Khahro, N. A. Memon, T. H. Ali, and Z. A. Memon, "Adoption of Prefabrication in Small Scale Construction Projects," *Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 5, pp. 1099–1104, 2019, doi: 10.28991/cej-2019-03091314.

- [6] A. Baghdadi, M. Heristchian, and H. Kloft, "Design of prefabricated wall-floor building systems using meta-heuristic optimization algorithms," *Autom. Constr.*, vol. 114, no. October 2019, p. 103156, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103156.
- [7] M. Wang, C. C. Wang, S. Sepasgozar, and S. Zlatanova, "A systematic review of digital technology adoption in off-site construction: Current status and future direction towards industry 4.0," *Buildings*, vol. 10, no. 11, pp. 1–29, 2020, doi: 10.3390/buildings10110204.
- [8] A. Peiris, F. K. P. Hui, C. Duffield, and T. Ngo, "Production scheduling in modular construction: Metaheuristics and future directions," *Autom. Constr.*, vol. 150, no. December 2022, p. 104851, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104851.
- [9] H. J. Wagner, M. Alvarez, O. Kyjanek, Z. Bhiri, M. Buck, and A. Menges, "Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM," *Autom. Constr.*, vol. 120, no. September, p. 103400, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103400.
- [10] P. Santos *et al.*, "Circular Material Usage Strategies and Principles in Buildings: A Review," *Buildings*, vol. 14, no. 1, 2024, doi: 10.3390/buildings14010281.
- [11] F. Ciampa *et al.*, "Architectural Technology responds to the environmental crisis: Participatory design in an emergency context," *Valori e Valutazioni*, vol. 2022, no. 30, pp. 119–133, 2022.
- [12] S. Cai, Z. Ma, M. Skibniewski, J. Guo, and L. Yun, "Application of automation and robotics technology in high-rise building construction: An overview," *ISARC 2018 - 35th Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Int. AEC/FM Hackathon Futur. Build. Things*, no. Isarc, 2018, doi: 10.22260/isarc2018/0044.
- [13] Z. Sun, H. Mei, W. Pan, Z. Zhang, and J. Shan, "A Robotic Arm Based Design Method for Modular Building in Cold Region," *Sustain.*, vol. 14, no. 3, 2022, doi: 10.3390/su14031452.
- [14] P. Vähä, T. Heikkilä, P. Kilpeläinen, M. Järviluoma, and E. Gambao, "Extending automation of building construction - Survey on potential sensor technologies and robotic applications," *Autom. Constr.*, vol. 36, pp. 168–178, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2013.08.002.
- [15] B. Xiao, C. Chen, and X. Yin, "Recent advancements of robotics in construction," *Autom. Constr.*, vol. 144, no. June, p. 104591, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104591.
- [16] M. J. Deigert, A. Behrouzi, and P. A. Brady, "Implementing bluebeam software in architectural engineering design courses," *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, vol. 2020-June, 2020, doi: 10.18260/1-2--34779.
- [17] W. Collins and L. Redden, "Assessing Industry Estimating Software Utilization Practices to Improve Construction Education," vol. 3, no. 2004, pp. 552–543, 2022, doi: 10.29007/pp26.