

## DIGITALISASI METODE KONSTRUKSI PADA PROYEK *HIGH-RISE BUILDING*

Daniel Maranatha Silitonga<sup>1</sup>, Stefanus Yobel Hendrawan<sup>2</sup>, dan Oei Fuk Jin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*daniel.327222001@stu.untar.ac.id*

<sup>2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*stefanus.327222004@stu.untar.ac.id*

<sup>3</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*fukjin.untar@gmail.com*

Masuk: 16-10-2023, revisi: 19-03-2024, diterima untuk diterbitkan: 08-07-2024

### ABSTRACT

*The construction of high-rise buildings is one of the tasks with high levels of risk and complex coordination. Technological innovations such as the internet of things (IoT), 3D printing, virtual reality (VR), artificial intelligence (AI), and building information modeling (BIM) have become solutions in facing the existing risks and challenges. The systematic literature review (SLR) method is used to analyze the development of digital transformation in high-rise building construction projects, so that the extent to which technology can help improve project efficiency, productivity, and quality can be understood. The stages of this SLR method are carried out through literature collection, identification process, and analysis of relevant articles on the discussion topic. Out of the 48 selected literature studies, it is shown that current construction digitalization involves the use of technology 4.0, construction robots, and automatic construction methods. All three have great potential for effective and efficient project management performance, as well as reducing occupational safety risks. However, the implementation of digital technology still faces various challenges, especially in terms of infrastructure provision and skilled human resources.*

*Keywords: Construction digitalization; construction 4.0; high-rise building; automated construction method*

### ABSTRAK

Proyek konstruksi *high-rise building* merupakan salah satu pekerjaan dengan tingkat risiko yang tinggi serta koordinasi yang kompleks. Inovasi teknologi seperti *internet of things (IoT)*, *3D printing*, *virtual reality (VR)*, *artificial intelligence (AI)* hingga *building information modeling (BIM)* telah menjadi solusi dalam menghadapi risiko serta tantangan yang ada. Metode *systematic literature review (SLR)* digunakan dalam menganalisis perkembangan transformasi digital pada proyek konstruksi *high rise building*, sehingga dapat diketahui sejauh mana peran teknologi dapat membantu meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kualitas proyek. Tahapan metode SLR ini dilakukan melalui pengumpulan literatur, proses identifikasi, hingga analisis artikel-artikel yang relevan terhadap topik pembahasan. Dari 48 studi literatur yang dipilih, menunjukkan bahwa digitalisasi konstruksi saat ini berupa penggunaan teknologi 4.0, robot konstruksi, serta metode konstruksi otomatis, ketiga hal tersebut memiliki potensi yang besar terhadap kinerja manajemen proyek yang efektif dan efisien, serta dapat mengurangi risiko keselamatan kerja. Meskipun demikian, implementasi teknologi digital masih menghadapi berbagai tantangan khususnya dalam hal penyediaan infrastruktur serta tenaga manusia yang terampil.

Kata kunci: Digitalisasi konstruksi; konstruksi 4.0; *high-rise building*; metode konstruksi otomatis

## 1. PENDAHULUAN

Proyek konstruksi *high rise building* menjadi salah satu pekerjaan dengan tingkat risiko kecelakaan kerja serta efek negatif pekerjaan yang tinggi, contohnya seperti jatuh dari ketinggian, runtuhnya struktur bangunan hingga disfungsi pendengaran dampak dari kebisingan. Untuk mengurangi risiko tersebut, pelaksanaan proyek konstruksi *high rise building* di era sekarang mulai mengarah pada penggunaan teknologi (Alireza et al., 2022).

Selain risiko terhadap aspek keselamatan kerja, proyek konstruksi *highrise building* seringkali menghadapi tantangan yang berkaitan dengan peningkatan biaya, kinerja proyek yang tidak optimal, rendahnya produktifitas, kurangnya kreatifitas dan inovasi hingga keberlanjutan proyek yang buruk. Inovasi teknologi digital seperti *internet of things (IoT)*, *3D printing*, *virtual reality (VR)*, *artificial intelligence (AI)* hingga *building information modeling (BIM)* menjadi solusi untuk mengatasi berbagai permasalahan tersebut (Bahareh et al., 2021).

Teknologi tidak hanya menyelesaikan berbagai masalah konstruksi tetapi juga mendorong konsep *lean construction* serta penyediaan sistem informasi yang lebih baik dalam siklus proyek. Digitalisasi didefinisikan sebagai proses peningkatan kinerja melalui teknologi informasi, komputasi, komunikasi dan konektivitas. Proses ini bergantung pada lima pilar digitalisasi yaitu integrasi teknologi terhadap sistem yang ada, re-organisasi dan pemilihan tenaga kerja terampil, perbaikan prosedur untuk kelancaran pertukaran dan pengelolaan data, dukungan seluruh anggota staf, dan investasi (Bahareh et al., 2021).

Artikel mengenai digitalisasi metode konstruksi pada proyek *high rise building*, sebagian besar mengulas penerapan teknologi digital hanya pada satu bidang tertentu seperti metode kerja BIM, ataupun *automatic construction manufacture*. Untuk mengisi kekurangan tersebut, penulis membuat *literature review* yang mengulas digitalisasi metode konstruksi pada proyek *high rise building*, pada perspektif yang lebih luas melalui cara:

1. Pencarian jurnal ilmiah terakreditasi dan relevan terhadap topik pembahasan,
2. Mengulas implementasi serta manfaat digitalisasi metode konstruksi pada proyek *high rise building*,
3. Membuat ringkasan digitalisasi metode konstruksi pada proyek *high rise building*.

### **High-rise building**

*Engineering Design Consultant (EDC)* mendefinisikan *high rise building* sebagai bangunan yang memiliki tinggi 35 m atau lebih. Konstruksi *high rise building* ditandai dengan siklus berulang secara berurutan pada setiap lantai (Sacks & Golding, 2007). *High rise building* juga memiliki karakteristik lantai bersifat modular pengulangan, tersedia sistem mekanis terpusat, dan berulang disetiap lantai seperti sistem transportasi, komunikasi, plumbing, pemanas dan pendingin udara (Ory & Abraham, 1995).

Proyek *high rise building* sifatnya *unique*, peralatan serta metode yang digunakan bergantung pada tantangan pekerjaan serta langkah-langkah keselamatan yang diperhitungkan. Perkembangan proyek *high rise building* sejak awal dipengaruhi oleh kemunculan teknologi dimana tahun 1854 insinyur Elisha Graves Otis menemukan lift penumpang yang memungkinkan bangunan dibuat lebih dari lima lantai. Beberapa alat konstruksi *high rise building* yang umum digunakan sekarang ini diantaranya *Tower Crane (TC)*, *Concrete Pump*, *lift cargo & penumpang*, hingga *windproof & heat-insulating fence* dalam memberikan keamanan bagi pekerja di ketinggian gedung (Kagan, 2018).

### **Peran teknologi konstruksi**

Penggunaan teknologi di industri konstruksi, dinilai dapat membantu proyek dalam memenuhi tenggat waktu penyelesaian yang ketat, mendorong efisiensi biaya, mengurangi limbah konstruksi dan menghasilkan proyek berkualitas tinggi (Rohani et al., 2013).

Teknik dan metode konstruksi modern sebagian besar mengadopsi penggunaan teknologi, diantaranya untuk melakukan simulasi skenario proyek hingga visualisasi dalam pengaturan sumber daya proyek. *Off Site Manufacturing (OSM)* pada proyek *high rise building* menjadi salah satu metode konstruksi modern yang mengadopsi teknologi, teknologi ini diterapkan pada *modular construction* (Rohani et al., 2013).

Teknologi modern juga membuat proses konstruksi, pengukuran, serta *quality control* menjadi lebih cepat dan akurat, sehingga manajemen dapat fokus terhadap tindakan pencegahan terjadinya masalah dan menjaga kualitas proyek secara keseluruhan (Miyakawa et al, 2000). Peran teknologi pada proyek konstruksi menjadi salah satu metode yang efektif di Negara Jepang, kondisi tenaga kerja yang berumur serta rendahnya minat pekerja muda di bidang konstruksi membuat Jepang kesulitan mendapatkan tenaga kerja yang kompeten. Inovasi teknologi konstruksi otomatis kemudian dikembangkan, menjadi solusi dalam menyelesaikan permasalahan tersebut, pada saat yang bersamaan, teknologi juga berperan meningkatkan produktivitas proyek (Miyakawa et al, 2000).

### **Strategi transformasi digital**

Penggunaan teknologi digital dinilai dapat mempermudah pekerjaan dan menghilangkan hambatan proyek secara signifikan (Mao et al., 2022). Pada sebuah penelitian dikemukakan terdapat enam kendala transformasi digital pada industri konstruksi yaitu (Dolla et al., 2023):

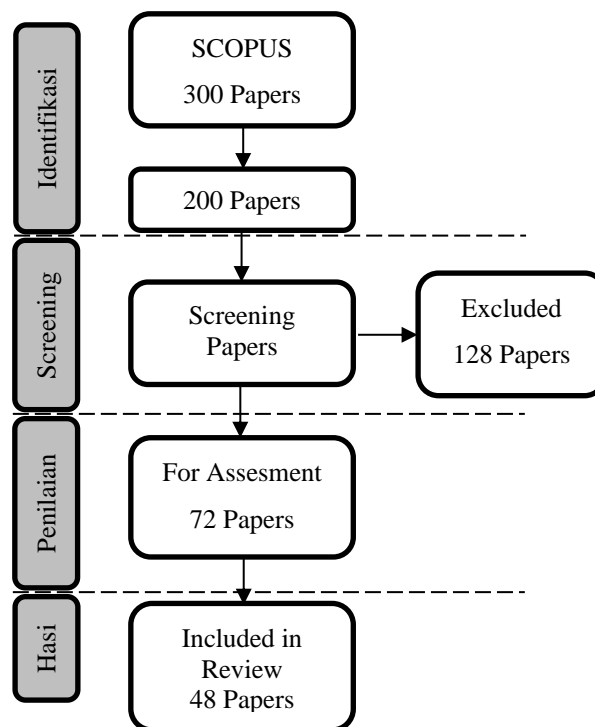
1. Teknologi digital merubah model bisnis secara signifikan.
2. Lapangan tidak siap menerima teknologi sebagai strategi inovasi.
3. Ketidaksiapan menghadapi tantangan baru transformasi digital.
4. Sulit menyadari manfaat inovasi digital akibat kesenjangan pengetahuan dan keterampilan
5. Ketidaksiapan investasi karena transformasi dianggap sebagai langkah reaktif
6. Inkonsistensi dan kegagalan melakukan pendekatan terkoordinasi

Transformasi digital memerlukan strategi untuk bergerak menuju digitalisasi, caranya melalui identifikasi tujuan utama, pembuatan *road maps*, tindakan yang mendukung proses transformasi, serta metode penilaian untuk mengukur dan mengevaluasi proses transformasi (Bahareh et al., 2021).

Transformasi membutuhkan dukungan dari pemangku kepentingan tertinggi dalam penggunaan dan penggabungan teknologi digital di seluruh siklus proyek. Mengutip hipotesis Dolla (2023) terdapat empat bingkai yang menjelaskan strategi transformasi digital yaitu redundansi, akomodasi, amplifikasi, dan pengenalan. Dari hasil penelitiannya, dikemukakan bahwa transformasi digital pertama-tama perlu mengeliminasi cara kerja lama yang tidak relevan dengan praktik dan teknologi 4.0. Kedua perlu mengintegrasikan seluruh komponen proyek untuk menghasilkan aturan serta peran baru dalam mengatur digitalisasi. Ketiga dibutuhkan upaya untuk meningkatkan pemahaman dan pengaruh positif penggunaan teknologi 4.0. Dan terakhir diperlukan pembuatan rencana strategis jangka panjang seperti mandat dari manajemen tertinggi, pembentukan tim hingga proses pelatihan (Dolla et al., 2023).

## 2. METODE PENELITIAN

Metode *systematic literature review* (SLR) digunakan oleh penulis melalui cara pengumpulan dan identifikasi penelitian yang relevan, serta analisis data dari penelitian tersebut. Melalui metode *literature review* yang sistematis dalam meninjau berbagai literatur yang diperoleh, penulis dapat mengurangi penilaian subjektif untuk menghasilkan temuan mengenai dari mana kesimpulan diambil dan dari mana keputusan dibuat. Ulasan SLR ini dilakukan dengan pendekatan sistematis, diagram alur dari proses ini ditunjukkan dalam Gambar 1. Tiga tahapan pada penelitian SLR adalah identifikasi, *screening*, dan penilaian (Snyder, 2019).



Gambar 1. Tahapan *literature review*

SLR ini bertujuan mempelajari digitalisasi metode konstruksi pada proyek *high rise building* baik *off-site* maupun *on-site construction*. Koleksi literatur diperoleh melalui *database* jurnal scopus melalui bantuan program *Publish or Perish 8*. Pencarian kata kunci dilakukan melalui judul artikel, kata kunci, dan abstrak. Kemudian dilakukan *screening* dengan mempelajari abstrak dari setiap artikel yang memiliki kaitan dengan digitalisasi metode konstruksi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

*Systematic literatur review* ini menggunakan beberapa kata kunci yaitu digitalisasi konstruksi, konstruksi 4.0, *high-rise building*, dan metode konstruksi otomatis. Kata kunci dimasukkan ke dalam program VOSviewer versi 1.6.19 seperti terlihat pada gambar 2, untuk mengetahui pemetaan penelitian – penelitian yang sudah ada sebelumnya. Dari hasil pemilihan literatur dan pemetaan kata kunci, diperoleh sebanyak 300 artikel awal, kemudian dilakukan



(Shakir, 2021). Proses tersebut cakupannya sangat luas, mulai dari penjadwalan proyek (BIM 4D), perhitungan biaya (BIM 5D), simulasi energi (BIM 6D) hingga *facility management* (BIM 7D).

BIM 4D pada proyek *high-rise building* menjadi metode insinyur melakukan penjadwalan proyek untuk meningkatkan integrasi antar *stakeholder*, melihat *sequence* pekerjaan, meningkatkan aspek keselamatan kerja, serta menjadi teknik dalam melakukan analisis dan *monitoring* potensi terjadinya *change order*, *clash* serta *rework* (Mao et al., 2022). Contoh penerapan BIM 4D dilakukan pada proyek *high rise building* berjumlah 49 lantai di College Road, London dengan bantuan *software* SynchroPro. Tujuan penerapan BIM 4D pada proyek ini adalah memastikan proyek selesai sesuai jadwal, melihat *sequence* pemasangan modular pada bangunan serta sebagai media demonstrasi pelaksanaan proyek kepada pemangku kepentingan *network rail* dan *transport for London*.

BIM 5D pada proyek bangunan *high rise* menjadi metode owner dan kontraktor melakukan perhitungan otomatis serta menjadi teknik *monitoring* anggaran secara transparan sehingga dapat membangun kepercayaan dengan berbagai pemangku kepentingan proyek (Dolla et al., 2023). Contoh penerapan BIM 5D dilakukan pada proyek *Residential* di Central Park Mukim Tebrau Johor Bahru, Malaysia dengan bantuan *software* Cubicost TAS, TRB & TBQ. Tujuan penerapan BIM 5D pada proyek ini adalah untuk mengurangi kesalahan perhitungan, proses efisiensi biaya serta melakukan *composite* pekerjaan arsitek dan struktur untuk menemukan perbedaan memerlukan perubahan.

Selain untuk mengukur waktu dan volume pekerjaan, BIM juga dapat mengukur dan mensimulasikan penggunaan energi melalui BIM 6D mencakup penilaian karakteristik maupun orientasi bangunan terhadap aspek *green building* serta dampaknya terhadap lingkungan (Sacks et al., 2027). Contoh penerapan BIM 6D pada proyek *high rise building* dilakukan pada proyek Skanka's Capitol Tower di Downtown Houston, Texas dengan bantuan *software* IESVE. Tujuan penerapan BIM 6D pada proyek ini adalah efisiensi energi 25% lebih baik dari standar yang berlaku, memperoleh sertifikasi *Leadership in energy and environmental design* (LEED), mengoptimalkan desain bangunan terhadap penggunaan daya energi secara signifikan, serta mengurangi dampak terhadap lingkungan.

Implementasi BIM pada proyek konstruksi *high rise building* sangat mendukung konsep *lean construction*, metode ini menyederhanakan kompleksitas pekerjaan dalam mengurangi jumlah limbah, hingga proses perbaikan secara terus-menerus. BIM menjadi dokumentasi digital sejak tahap perencanaan, fase konstruksi hingga pengoperasian bangunan (Sacks Rafael, 2010). Perkembangan penggunaan BIM di Indonesia secara umum mengalami tren positif walaupun masih terbatas. Hal ini dikuatkan oleh hasil penelitian Khasani (2018), yang menunjukkan bahwa implementasi BIM di Indonesia mencapai angka 67.46%, angka tersebut diartikan bahwa implementasi BIM di Indonesia "cukup tercapai". Tantangan utama implementasi BIM di Indonesia berkaitan dengan biaya lisensi perangkat lunak yang mahal serta kurangnya kompetensi sumber daya manusia (Khasan, 2018).

*Internet of things* (IoT) menjadi salah satu teknologi utama dalam transformasi digital. IoT diartikan sebagai jaringan yang membuat perangkat fisik dan virtual saling terhubung, dan merespon informasi. Melalui IoT, informasi dapat terus dibangun, diperbarui dan disimpan melalui *cloud*, hal tersebut memungkinkan data selalu tersedia dan siap diproses saat kapanpun diperlukan. Implementasi IoT pada metode konstruksi *high rise building* umumnya digunakan pada pekerjaan *site monitoring*, *machine control*, *construction safety*, dan *project management* (Kagan, 2018).

Dalam hal *site monitoring*, IoT dapat merubah proses pemantauan, pelacakan dan pencatatan aktivitas manusia dan mesin dari manual menjadi otomatis dengan hasil yang lebih akurat. Metode pelacakan dan pencatatan ini menggabungkan IoT dan bantuan alat lain seperti *global positioning system* (GPS), *radio frequency identification* (RFID), sensor dan drone (Kagan, 2018). Salah satu contoh penggunaan IoT dengan RFID dilakukan pada proyek Pre-fabrikasi rumah susun di Hongkong. Keuntungan penggunaan IoT dan RFID pada proyek ini adalah efisiensi pertukaran informasi, efektifitas pelacakan material saat logistik dan *assembly*, pelacakan kemajuan proyek yang tervisualisasi serta pengambilan keputusan yang lebih terukur.

Dalam hal *machine control*, IoT dapat mengendalikan mesin manual menjadi otomatis melalui sensor maupun pengendalian jarak jauh, IoT dapat digunakan dalam proses pemeliharaan mesin, pengukuran penggunaan bahan bakar, suhu mesin, kondisi peralatan, biaya pemeliharaan hingga umur pakai mesin (Kagan, 2018).

Pada proyek *high rise building*, IoT berperan penting dalam mengintegrasikan perangkat digital dengan insinyur proyek, IoT menjadi salah satu kunci inovasi untuk mendorong peningkatan manajemen waktu dan biaya proyek yang lebih efisien. Teknologi ini juga meningkatkan produktivitas pekerjaan serta membantu pemahaman pekerjaan yang lebih baik terhadap seluruh siklus proyek konstruksi. Penggunaan IoT seringkali memiliki tantangan utamanya berkaitan dengan ketersediaan infrastruktur koneksi internet yang buruk, kondisi ini menyebabkan *transfer* data dan informasi menjadi tidak akurat, serta interoperabilitas perangkat IoT itu sendiri menjadi terhambat (Ibrahim et al., 2021).

### **Artificial intelligence (AI)**

*Artificial intelligence* (AI) pada proyek *high rise building* digunakan untuk membantu mengatasi keterbatasan manusia dalam memproses pekerjaan. AI dalam industri konstruksi dapat berupa (Mohammadpour et al. 2019):

1. *Machine learning* yang diterapkan pada teknologi pengenalan gambar untuk membantu pemantauan serta keselamatan pekerja proyek.
2. *Knowledge-based systems* yang diterapkan pada pekerjaan *architecture engineering construction* (AEC) berbasis pengetahuan dalam memberi rekomendasi tata letak ataupun pemilihan material.
3. *Computer vision* yang diterapkan pada sistem visualisasi realistik seperti dalam pengukuran dan pemetaan topografi.
4. Robotika yang mengganti berbagai pekerjaan manusia khususnya pada pekerjaan repetitif maupun *high risk*.
5. *Natural language processing* seperti pada sistem pemrosesan dokumen dan chatbots penyediaan informasi.

Selain itu juga AI dapat digabungkan dengan alat lain seperti drone yang berhubungan dengan kegiatan survei, konstruksi modular dalam hal produksi dan perakitan secara otomatis, kendali kendaraan konstruksi otonom, 3D printing, hingga penggunaan *virtual reality* (VR) & *augmented reality* (AR). Salah satu tantangan penggunaan AI dalam industri konstruksi yaitu menemukan cara yang tepat dalam mengumpulkan informasi dan membuatnya memahami situasi pada kondisi yang sebenarnya, selain itu diperlukan juga teknik mengumpulkan informasi yang relevan, kesalahan pengumpulan informasi akan mengarah pada hasil yang tidak akurat dan berpengaruh pada pengambilan keputusan (Mohammadpour et al., 2019).

Kecanggihan AI pada proyek konstruksi *high rise building* tidak dapat sepenuhnya menggantikan kecerdasan manusia maupun menyelesaikan pekerjaan konstruksi secara otomatis, tetapi algoritma pada AI dapat membantu pemecahan masalah yang kompleks, seperti memberikan informasi mengenai situasi proyek, ataupun mengenali perubahan pekerjaan, *output* yang dihasilkan oleh AI dalam hal ini dapat dijadikan parameter dalam pengambilan keputusan akhir secara manual (Eber, 2020).

### **Cloud**

Dalam proyek *high rise building*, *cloud* menjadi pengembangan teknologi informasi yang banyak bersinggungan dengan penerapan BIM. *Cloud* diartikan sebagai kesatuan dari 4 fungsi yaitu aplikasi yang dapat diakses dimanapun, platform sebagai sistem yang bertugas memproses serta mendistribusikan informasi, infrastruktur yang membagi informasi menjadi bagian-bagian terpisah dan hardware sebagai server penyimpanan informasi. *Cloud* dapat berbentuk *private* yang digunakan secara eksklusif oleh satu organisasi tertentu, *public* yang dapat diakses secara umum, dan *community* yang dapat digunakan organisasi tertentu yang memiliki kepentingan bersama. Salah satu implementasi teknologi *cloud* dalam metode konstruksi dipergunakan pada integrasi BIM seperti Autodesk BIM 360, Trimble Connect, Cadd Force, BIM9, BIMServer, BIMx, dan Onuma Syste. Interoperabilitas adalah kunci keberhasilan *cloud* dalam industri konstruksi (European Construction Sector Observatory, 2021).

Kerumitan serta banyaknya anggota tim yang terlibat dalam proyek konstruksi *high rise building*, seringkali menjadi hambatan utama dalam proses kolaborasi pelaksanaan proyek. Untuk mengatasi hal tersebut, teknologi *cloud* menjadi *platform* yang menjembatani kolaborasi antar anggota secara efektif dan terintegrasi. *Cloud* juga menjadi solusi untuk menangani kompleksitas data dalam ukuran yang besar. Teknologi *cloud* membuat proses kolaborasi menjadi sederhana sehingga produktifitas dan efisiensi menjadi lebih baik. Pemrosesan data melalui *cloud* memiliki tantangan berkaitan dengan metode serta manajemen data yang efisien sepanjang siklus proyek konstruksi (Li et al., 2013).

### **Generative design (GD)**

*Generative design* (GD) merupakan salah satu metode konstruksi untuk mengatasi berbagai kendala dengan bantuan pemrosesan komputasi, GD dapat menghasilkan berbagai solusi berhubungan dengan desain maupun manajemen proyek yang memenuhi persyaratan secara otomatis, selain itu GD juga cara dalam mempercepat tahap awal pekerjaan tim AEC (Haeusler et al., 2019).

GD pada digitalisasi metode konstruksi proyek *high rise building*, dapat meningkatkan efisiensi serta kualitas perencanaan proyek yang lebih baik, dengan mempertimbangkan parameter-parameter seperti geometri, biaya dan lingkungan. Implementasi GD memiliki tantangan yang berhubungan dengan kemampuan analisis serta pemahaman kinerja desain dan algoritma untuk mengotomatisasi proses GD (Oscar et al., 2023).

### **Augmented reality (AR) & virtual reality (VR)**

Komunikasi visual pada proyek konstruksi terkait bentuk, ukuran, fungsi dinilai sebagai metode yang lebih praktis dibandingkan dengan prototype dalam bentuk fisik yang mempengaruhi biaya dan waktu menjadi tidak efisien. Dalam penggunaan AR & VR, terdapat beberapa proses yang perlu di lakukan yaitu pembuatan model 3D sesuai dengan

objek proyek, kemudian menambahkan berbagai informasi seperti material yang digunakan dan terakhir proses *cubemap* yaitu membuat gambar menjadi 6 sisi bidang dari arah pandang AR & VR (Piroozfar et al., 2018).

AR & VR pada proyek konstruksi *high rise building* memiliki berbagai manfaat utamanya berkaitan dengan manajemen risiko serta perencanaan keselamatan proyek yang efektif. AR & VR juga dapat digunakan dalam membantu manajemen fasilitas yang rumit di lokasi proyek. AR & VR pada proyek konstruksi *high rise building* sekarang ini belum mencapai level *maturity*. Tantang yang menyebabkan kondisi tersebut berasal dari kompetensi SDM, praktik pada proyek konstruksi yang minim, serta nilai investasi yang besar (Monla et al., 2023).

### **Light detection and ranging (LiDAR)**

Dalam proyek *high rise building*, LiDAR merupakan salah satu teknologi yang dapat diterapkan pada teknik dan metode konstruksi. Teknologi LiDAR menghasilkan *point cloud* yaitu sekumpulan data titik dengan koordinatnya (X, Y, dan Z) yang dapat merepresentasikan objek ataupun permukaan pada kondisi sebenarnya dalam bentuk 3D. Proses terciptanya ini menggunakan *laser scanning*. Pada saat pra-konstruksi, *engineer* dapat melakukan laser scanning untuk memetakan lahan. Pada tahap fabrikasi dan konstruksi, *engineer* melakukan *laser scanning* untuk membantu *progress tracking*. Laser scanning juga dapat diterapkan untuk membuat data *as built* proyek untuk digunakan pada fase operasi dan pemeliharaan bangunan (Abbas et al., 2020).

Salah satu contoh implementasi LiDAR dilakukan pada proyek renovasi hotel berjumlah 19 lantai di kota Toledo, Ohio. *Engineer* menilai bahwa ketiadaan gambar *as built* membuat proses renovasi memakan waktu yang lebih lama, selain itu perencanaan proyek juga menjadi lebih sulit dan mahal. Melalui penggunaan LiDAR, *engineer* dapat menangkap dan mendemonstrasikan kondisi bangunan hotel yang terukur secara efektif dan efisien.

Dalam proyek konstruksi *high rise building*, teknologi LiDAR dan sistem komputer dapat menciptakan bentuk objek bangunan melalui *point cloud* sesuai dengan kondisi yang sebenarnya dengan tingkat akurasi data yang tinggi, namun kesalahan dalam pengoperasian LiDAR dapat membuat objek palsu serta pengelolaan data menjadi sangat kompleks. Teknologi ini juga perlu didukung sistem komputasi yang tinggi untuk melakukan analisis data (Zhang, 2006).

### **Robotisasi konstruksi**

Bock dan Linner (2016) membahas penggunaan robot otomatis pada pre-fabrikasi bata, beton pracetak, prefabrikasi struktur kayu, dan fabrikasi struktur baja. Bock menyatakan terdapat beberapa parameter yang harus dipenuhi dalam otomatisasi dan penggunaan robot pada pekerjaan konstruksi yaitu:

1. Kebebasan dalam estetika dan desain
2. Penentuan biaya produksi sebelum pelaksanaan pekerjaan
3. Penentuan waktu produksi sebelum pelaksanaan pekerjaan
4. Jaminan dan transparansi biaya
5. Produksi berkelanjutan
6. Penentuan kualitas
7. Kontrol dan transparansi kualitas

Melenbrik et al. (2020) membahas tentang hal – hal teknis yang perlu diperhatikan dalam penggunaan robot konstruksi, seperti pengumpulan informasi lewat komputer dan mesin, artinya robot harus mengenal pemetaan, penggunaan material, perencanaan hingga tugas kontrol. Konsep dari penelitian Melenbrik et al bisa membantu untuk mendefinisikan penelitian kedepannya pada hal penggunaan sistem robot yang kompleks.

### **Framework 4D/RCS**

Dersten et al. (2015) meneliti model *framework 4D/RCS* yang digunakan *unmanned ground vehicle (UGV)* militer untuk diaplikasikan kepada pekerjaan konstruksi. Arsitektur 4D/RCS mampu menangani perencanaan, kontrol pekerjaan dan mampu memahami lingkungan sekitar. Kemampuan 4D/RCS dinilai mampu melakukan otomatisasi kendaraan berat dalam proyek konstruksi. 4D/RCS adalah *framework* yang dikembangkan untuk melakukan pergerakan yang sederhana, sedangkan alat berat konstruksi otomatis memerlukan pergerakan yang lebih rumit.

### **Sistem navigasi robot**

Alat berat yang otomatis memerlukan sistem navigasi untuk melokalisasi pergerakannya. Penelitian tesis yang dilakukan oleh Yu (2020) menyatakan bahwa *global navigation satellite system (GNSS)* tidak bisa diandalkan dalam situasi lingkungan yang kompleks. *Latency* GNSS menjadikan lokalisasi alat berat otomatis terlambat dan tidak akurat dapat mengakibatkan alat menabrak objek. Yu melaksanakan penelitian dengan memasang 2 kamera monokular untuk mengestimasi posisi dari alat berat otomatis. Penanda fidusial merupakan visual buatan untuk robot melacak area sekitarnya. Penanda fidusial yang dipakai menggunakan AprilTag yang dipasang di 4 sisi kendaraan berat. Setelah

dilaksanakan eksperimen *indoor* dan *outdoor*, sistem lokalisasi terbukti secara akurat melokasikan posisi kendaraan berat otomatis.

## Exoskeleton

*Exoskeleton* di bidang konstruksi ditujukan untuk meningkatkan produktivitas, serta keselamatan kerja dengan meningkatkan kekuatan fisik, motorik dan kognitif penggunaannya. Pekerjaan konstruksi umumnya didominasi pekerjaan fisik yang beresiko terhadap gangguan pada otot dan tulang pekerja, seringkali kondisi ini menjadi penyebab utama cedera di industri konstruksi (Sobeih et al., 2006).

Teknologi *exoskeleton* pertama kali di patenkan pada tahun 1890 oleh seorang insinyur dari Kekaisaran Rusia, Nicholas Yagin. Walau teknologi *exoskeleton* dimulai oleh Nicholas Yagin sebagai teknologi aplikasi untuk sipil, teknologi ini lebih berkembang pesat dalam industri militer. *Exoskeleton* sekarang ini dikembangkan untuk pekerjaan sipil, medis dan manufaktur. Dalam manufaktur, *exoskeleton* bertujuan untuk mengurangi cedera pengguna dan mengurangi potensi kesalahan saat pengguna kelelahan (Marinov, 2019).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Bennett et al. (2022) mereka melakukan eksperimen terhadap pekerja konstruksi untuk mengetahui pengaruh penggunaan *exoskeleton* pada pekerjaan proyek konstruksi. Berdasarkan survey kepada para pekerja, sebagian besar pekerja merasa puas dengan teknologi *exoskeleton* saat menjaga punggung tetap sejajar dan dapat mengurangi beban yang diterima.

Pada studi Bär et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan *exoskeleton* bisa mengurangi detak jantung pengguna. Saat melakukan penelitian, salah satu partisipan menunjukkan peningkatan detak jantung saat beraktivitas menggunakan *exoskeleton*. Hal ini diakibatkan faktor psikis partisipan tersebut yang merasa gugup dan tidak nyaman akibat ikatan lilitan di kaki dan lengan yang ketat.

Salah satu contoh negara yang menggunakan teknologi *exoskeleton* pada bidang konstruksi adalah Hong Kong. Hong Kong memiliki budaya yang menuntut produktivitas tinggi tanpa melupakan standar keamanan konstruksi. Topografi bangunan yang sempit dan berhimpitan membatasi penggunaan mesin besar, dan mendorong penggantian pekerjaan alat berat kepada manusia. Penelitian Linner et al. (2018) menyimpulkan, dalam tantangan Hong Kong menghadapi SDM nya yang sudah menua dan jumlahnya yang sedikit, *exoskeleton* bisa menjadi teknologi untuk menyelesaikan masalah yang memungkinkan tenaga kerja wanita dan berusia tua untuk memenuhi tuntutan pekerjaan proyek.

## Drone

Walaupun drone cepat berkembang dalam teknologi militer, perkembangan teknologi memungkinkan penggunaan drone berkembang kepada penerapan non militer seperti tugas pengawasan, inspeksi infrastruktur, pengantaran barang hingga *entertainment*. Dupont et al. (2017) meneliti kemampuan drone UAV yang dihubungkan dengan sistem BIM untuk meningkatkan produktivitas konstruksi. Dalam penelitian tersebut, diidentifikasi beberapa tantangan untuk mencapai tujuan produktivitas, yaitu tantangan dalam sisi robotika, sisi perangkat lunak dan sisi teknik sipil. Tantangan pada sisi robotika berkaitan dengan keamanan navigasi otomatis drone pada lingkungan *indoor*, dan pada sisi perangkat lunak dan teknik sipil berkaitan dengan integrasi data yang dikumpulkan pada perangkat lunak.

Ngadiman et al. (2019) melakukan studi untuk meneliti lereng sepanjang 150 meter dan ketinggian 20 meter di Taman Harmoni Vista, Jalan Panchor, Pagoh. Lereng yang berpotensi longsor diambil datanya berupa foto oleh drone DJI Go, data tersebut kemudian diolah oleh Pix4D. pada penelitian tersebut penggunaan drone UAV dinilai menjadi metode alternatif yang lebih fleksibel, cepat dan efektif untuk mengumpulkan data visual.

Martinez et al. (2020) meneliti bagaimana teknologi drone dan data visual yang didapat oleh drone mempengaruhi pelaksanaan perencanaan *safety* dan memantau konstruksi bangunan *high rise* di Chile. Pada studinya, dengan menggunakan drone, manajer *safety* dapat mengurangi total waktu yang diperlukan untuk melakukan kunjungan lapangan secara signifikan. Walaupun penggunaan drone untuk pengawasan dan perencanaan *safety* masih dalam tahap pengembangan di Chile, penggunaan drone memiliki pengaruh signifikan dalam perencanaan dan pengawasan konstruksi bangunan *high rise*. Keberadaan drone membantu anggota *safety* yang terbatas untuk mengatasi pelaksanaan konstruksi.

Shang dan Shen (2017) melakukan studi menggunakan *simultaneous localization and mapping* (SLAM) dibantu oleh drone untuk merekonstruksi area konstruksi secara 3D secara *real-time*. SLAM dan UAV menjadi alat yang lebih efisien untuk rekonstruksi 3D dibandingkan *photogrammetry*.

Studi yang dilakukan oleh Tjandra et al. (2022) bertujuan untuk memahami kesiapan aplikasi penggunaan *Drone* di industri konstruksi Indonesia. Penggunaan *drone* pada konstruksi banyak menarik minat pelaksana jasa konstruksi, tetapi tingkat pemahaman pelaksana jasa konstruksi masih rendah. Tingkat pengetahuan tentang macam kegunaan *drone* untuk konstruksi juga masih rendah. Kurangnya kemampuan SDM dan resiko menjadi dua halangan utama di aplikasi *drone* industri konstruksi Indonesia.



Kim et al. (2021) menggunakan konverter data IFC ke SDF untuk menyambungkan teknologi heterogen dari BIM dengan *robot operating system* (ROS). Uji coba dilakukan dengan menggunakan robot *painting* dan Revit. Robot dilengkapi perangkat untuk melaksanakan pekerjaan pengecatan diprogram sesuai dengan data dari BIM. Sistem pemrograman yang dikembangkan mampu menghasilkan respon robot yang akurat dengan memanfaatkan informasi data BIM.

### **Tantangan robotisasi**

Industri konstruksi merupakan salah satu industri yang sangat penting dalam perekonomian. Biaya yang dikeluarkan pada bidang konstruksi sekitar 9% - 15% GDP di kebanyakan negara (Oesterreich dan Teuteberg, 2016). Robotik dan sistem otomasi memiliki potensi untuk menyelesaikan masalah inefisiensi dan produktivitas yang rendah, namun adopsi robot pada industri konstruksi masih sangat rendah. Beberapa penelitian telah diadakan untuk mencari tahu beberapa faktor yang membatasi penggunaan dan pengembangan robot pada industri konstruksi.

Penggunaan robot untuk industri konstruksi pertama kali tercatat pada tahun 1970-an pada proyek konstruksi di Jepang. Pada tahun 1980-an sudah lebih dari 200 prototip robot dibuat dan dicoba di lapangan. Beberapa dari model masih hidup dan memberikan kontribusi terhadap modernisasi konstruksi. Para teknisi Jepang bekerja sangat keras untuk riset dan pengembangan robot konstruksi namun mereka gagal untuk mendapatkan pengembalian investasi mereka (Yoshida, 2006).

Pada penelitian Parascho (2022) dengan menganalisa beberapa penelitian dalam waktu 23 tahun terakhir memperlihatkan bahwa otomatisasi murni bukanlah tujuan satu – satunya dalam bidang penelitian. Tantangan sebenarnya dalam kolaborasi manusia dan robot dalam konstruksi adalah adanya celah antara bidang ilmu pengetahuan. Perlu adanya komunikasi yang lebih baik antar bidang ilmu dan menyediakan sarana agar mudah menerjemahkan teknologi robot untuk aplikasi pada industri konstruksi.

Robotisasi industri konstruksi memiliki tantangan terhadap sistem robot dalam bertindak dan merespon suatu kondisi. Hal ini berkaitan dengan situasi lapangan yang bersifat dinamis, dimana segala tindakan terencana seringkali memiliki ketidakcocokan dengan keadaan sebenarnya (Xu & de Soto, 2020).

### **Metode konstruksi otomatis**

Linner dan Bock (2009) berpendapat bahwa konstruksi *high-rise* otomatis dianalogikan sebagai pabrik yang bergerak vertical, memiliki sistem penyimpanan otomatis dan disalurkan melalui perlengkapan rakitan serta teknologi robot. Tujuan sistem ini adalah meningkatkan organisasi proses dan manajemen konstruksi dengan menggunakan teknologi informasi dan sistem kontrol yang canggih.

#### ***Automated building construction system (ABCS)***

*Automated building construction system* (ABCS) dikembangkan pertama kali oleh kontraktor asal Jepang Obayashi Corporation. Pembangunan *high rise building* sangat mengandalkan penggunaan *tower crane*, hal ini sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Selain itu tenaga kerja yang didominasi berusia tua serta kalangan muda kurang tertarik dengan industri konstruksi menjadi masalah lain dalam pembangunan *high rise building*. ABCS dikembangkan pada tahun 1989 dengan tujuan dapat menyelesaikan masalah-masalah tersebut.

Metode ABCS menggunakan struktur serupa cangkang luar yang terdiri dari kolom – kolom baja, rafter dan balok baja pada elevasi ketinggian yang sedang dikerjakan. Kolom baja kemudian ikut menjadi bagian utama bangunan. Cangkang luar yang disebut *super construction factory* (SCF) berupa atap dan tembok panel yang berfungsi melindungi seluruh aktivitas konstruksi didalamnya dari pengaruh luar. ABCS dilengkapi berbagai *hoist crane*, *jib crane*, serta lift yang sistemnya sudah otomatis. Sistem ABCS dibagi menjadi 3 sistem yaitu sistem manajemen produksi, sistem manajemen operasional alat dan sistem kendali mesin (Ikeda et al., 2000).

Proyek kelima (Proyek O) penggunaan ABCS merupakan proyek *hybrid* dengan menggabungkan metode konstruksi ABCS dan metode konstruksi konvensional. Berdasarkan studi proyek O dari Yuichi dan Tsunenori (2006), dari 4 proyek konstruksi sebelumnya yang menggunakan metode ABCS, proyek O memakai jumlah tenaga kerja paling sedikit.

#### ***Shimizu manufacturing system by advanced robotics technology (SMART)***

Metode konstruksi serupa ABCS milik Kobayashi dikembangkan oleh Shimizu yang diberi nama *Shimizu manufacturing system by advanced robotics technology* (SMART). SMART mengendalikan semua fase pembangunan dari bagian terbawah bangunan, pekerjaan *superstructure* sampai dengan pekerjaan *finishing* dan ME pada bangunan *high rise*. Metode SMART pertama kali dipakai pada proyek bangunan *high rise* Bank Nagoya Juroku, Jepang (Maeda, 1994).

Tujuan metode konstruksi SMART adalah membuat lingkungan kerja yang aman dan nyaman. SMART juga bertujuan untuk mengurangi jumlah jam kerja manusia dan mempersingkat durasi proyek. Beberapa sistem teknologi yang diaplikasikan di SMART berupa:

- Sistem dongkrak
- Sistem pelangsiran otomatis (*crane, hoist*)
- Sistem rakit baja otomatis
- Sistem pengelasan otomatis
- Sistem transportasi dan instalasi mesin dan material otomatis
- Sistem pusat kontrol dan informasi

Hasil studi oleh Maeda (1994) dari pembangunan Nagoya Juroku didapat bahwa dengan metode konstruksi SMART dapat meningkatkan lingkungan kerja yang lebih baik. Sistem SMART yang tertutup dari area luar memungkinkan pekerjaan tetap berlanjut walaupun dalam keadaan cuaca buruk. Pekerjaan yang melibatkan beban berat dan berbahaya bisa diminimalisir karena sistem perakitan baja otomatis. Keterlibatan personel saat perakitan struktur baja bisa diminimalisir. Pengaruh kontrol yang sudah otomatis serta robot – robot yang ada memungkinkan untuk mengurangi jumlah jam kerja. SMART mampu mengurangi jam kerja sekitar 50% dari metode konvensional. Menurut Lu et al. (2020), beban kerja untuk pengaturan proyek juga lebih ringan dikarenakan sistem informasi sudah dibantu oleh komputer. *Waste* material yang dihasilkan bisa dikurangi sekitar 70% karena sistem modularisasi dan fabrikasi yang otomatis.

## AMURAD

Metode konstruksi AMURAD dikembangkan oleh perusahaan konstruksi Jepang, Kajima. Lantai satu sampai lantai empat bangunan berfungsi sebagai pabrik. Metode AMURAD memiliki prinsip yang sama seperti metode ABCS dan SMART, perbedaannya AMURAD memulai konstruksi dari tingkat elevasi tertinggi bangunan. Saat satu pekerjaan lantai selesai.

Beberapa komponen teknologi yang dipakai pada metode ini adalah 10 unit mesin dongkrak raksasa yang masing – masing berkapasitas sebesar 400 ton dan 600 ton. Unit – unit hoist besar dan monorail yang mampu merakit baja yang dioperasikan secara *wireless*. Komponen penting lainnya pada AMURAD adalah sistem komputer yang terintegrasi. Seluruh informasi konstruksi dimasukkan ke dalam *project database*. Berdasarkan kumpulan informasi tersebut, kontrol kerja hingga kontrol material dilakukan secara otomatis.

Pada studi yang dilakukan oleh Sekiguchi et al. (1997) hasil dari penggunaan metode konstruksi AMURAD mampu menghemat jumlah tenaga kerja sebesar 22%, terutama pada pekerjaan struktur mampu menghemat sebesar 40% dibanding metode konvensional. Periode konstruksi juga dapat dipotong sebesar 20%, tetapi pada studi mereka beberapa pekerjaan baru bisa dilaksanakan setelah mesin – mesin dan perlengkapan sudah dibongkar. Menurut Sekiguchi et al periode konstruksi bisa lebih singkat apabila penyediaan mesin dan pekerjaan konstruksi dilaksanakan secara bersamaan.

## 5. KESIMPULAN

Proyek konstruksi *high-rise building* menjadi salah satu pekerjaan dengan tingkat kerumitan yang tinggi terhadap manajemen proyek. Untuk mengatasi tantangan tersebut, pekerjaan konstruksi *high rise building* saat ini mulai mengarah pada transformasi digital pada berbagai aspek. Penulis menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) untuk mengetahui dan menganalisis sejauh mana transformasi digital dapat dilakukan pada proyek konstruksi *high rise building*. Dari 49 artikel terpilih, menunjukkan bahwa digitalisasi era sekarang berkembang cukup luas. Pertama berhubungan dengan teknologi 4.0 berupa *building information modeling* (BIM), *internet of things* (IoT), *artificial intelligence* (AI), *virtual reality* (VR) / *augmented reality* (AR), hingga *light detection and ranging* (LiDAR) dalam membantu meningkatkan efisiensi serta produktivitas proyek. Kedua berhubungan dengan robotisasi konstruksi, berupa penerapan berbagai jenis robot untuk mengurangi waktu dan biaya serta meningkatkan keselamatan kerja. Ketiga berhubungan dengan metode konstruksi otomatis, yang memungkinkan pemodelan hingga pencetakan 3D dalam meningkatkan akurasi pekerjaan serta ketepatan waktu penyelesaian proyek. Ketiga hal tersebut menunjukkan bahwa digitalisasi konstruksi proyek *high rise building* memiliki potensi besar untuk mengatasi berbagai tantangan pekerjaan seperti peningkatan kolaborasi antar *stakeholder*, menghasilkan estimasi yang lebih akurat, *monitoring* proyek yang efektif dalam mengendalikan waktu dan biaya, meningkatkan efisiensi, keamanan, serta kualitas proyek. Terlepas dari kelebihannya, implementasi digitalisasi konstruksi pada proyek *high rise building* juga memiliki beberapa tantangan, seperti ketersediaan koneksi internet yang baik, kemampuan interoperabilitas perangkat IoT, ketersediaan SDM yang kompeten, diperlukannya investasi besar dalam penyediaan alat serta proses *re-engineering* yang rumit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, R., Westling, F. A., Skinner, C., Hanus-Smith, M., Harris, A., & Kirchner, N. (2020). Built view: Integrating LiDAR and BIM for real-time quality control of construction projects. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 37, 233-239. DOI: 10.22260/ISARC2020/0034
- Bennett, S. T., Adamczyk, P. G., Dai, F., Veeramani, D., Wehner, M., & Zhu, Z. (2022). Exoskeletons in construction and their role in the future of work. *Proceedings of the 1st Future of Construction Workshop at the International Conference on Robotics and Automation*. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10484589>
- Bock, T., & Linner, T. (2016). *Site automation: automated/robotic on-site factories*. Cambridge University Press.
- Dersten, S., Axelsson, J., & Fröberg, J. (2015). An analysis of a layered system architecture for autonomous construction vehicles. *2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings*, 582-588. doi: 10.1109/SYSCON.2015.7116814
- Dolla, T., Jain, K., & Delhi, V. S. K. (2023). Strategies for digital transformation in construction projects: stakeholders' perceptions and actor dynamics for Industry 4.0. *Journal of Information Technology in Construction*, 28, 151–175. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.008
- Dupont, Q. F. M., Chua, D. K. H., Tashrif, A., & Abbott, E. L. S. (2017). Potential applications of UAV along the construction's value chain. *Procedia Engineering*, 182, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.155>
- Eber, W. (2020). Potentials of artificial intelligence in construction management. *Organization, Technology and Management in Construction 2020*, 12(1), 2053–2063. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2020-0002>
- European Construction Sector Observatory. (2021). *Digitalization in the construction sector (analytical report)*. European Commission. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/45547>
- Haeusler, M. H., Schnabel, M. A., & Fukuda, T. (Eds.). (2019). *Intelligent & Informed: Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2019)*. Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.
- Ibrahim, F. S. B., Esa, M. B., & Rahman, R. A. (2021). The adoption of IOT in the Malaysian construction industry: towards construction 4.0. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(1), 56-67. <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/6299>
- Ikeda, Y., & Harada, T. (2006). Application of the automated building construction system using the conventional construction method together. *Proceedings of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 35.
- Kagan, P. (2018). Management, mechanization and automation of work in the construction of high-rise buildings. *MATEC Web Conf*, 170, 01071. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817001071>
- Khasani, R. R. (2018). Assessment of bim in high-rise building construction in Indonesia. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 7(7), 112-117.
- Kim, S., Peavy, M., Huang, P-C., & Kim, K. (2021). Development of BIM-integrated construction robot task planning and simulation system. *Automation in Construction*, 127, 103720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103720>
- Linner, T. and Bock, T. (2009). Customization in architecture: Towards customizable intelligent buildings. *Conference on Mass Customization, Personalization and Co-creation*.
- Linner, T., Pan, M., Pan, W., Taghavi, M., Pan, W., & Bock, T. (2018). Identification of usage scenarios for robotic exoskeletons in the context of the Hong Kong construction industry. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 40-47. <https://doi.org/10.22260/isarc2018/0006>
- Li, H., Rezgui, Y., & Rana, O. F. (2013). Editorial for special issue: Cloud computing and distributed data management in the AEC – architecture, Engineering and Construction Industry. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 158–159. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.04.002>
- Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>
- Maeda, J. (1994). Development and application of the SMART system. *Automation and Robotics in Construction XI*, 457-464.
- Mao, Z., Gonzalez, V. A., & Zou, Y. (2022). Exploring a digital twin framework for lean management of constraints in construction: A literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101, 082019. DOI 10.1088/1755-1315/1101/8/082019
- Marinov, B. (2019). Passive exoskeletons establish a foothold in automotive manufacturing. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/borislavmarinov/2019/05/15/passive-exoskeletons-establish-a-foothold-in-automotive-manufacturing/?sh=7bfbf40534ce>

- Martinez, G. J., Masoud, G., & F, A. L. (2020). UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building construction project in Chile. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 05020005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000761)
- Miyakawa, H., Ochiai, J., Oohata, K., & Shiokawa, T. (2000). Application of automated building construction system for high-rise office building. *Proceedings International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 1-6.
- Mohammadpour, A., Karan, E., & Asadi, S. (2019). Artificial intelligence techniques to support design and construction. *Waterloo*, 36, 1282-1289. DOI:10.22260/ISARC2019/0172
- Monla, Z., Assila, A., Beladjine, D., & Zghal, M. (2023). Maturity evaluation methods for BIM-based AR/VR in construction industry: A literature review. *IEEE Access*, 11, 101134–101154. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3281265>
- Ngadiman, N., Badrulhissham, I. A., Mohamad, M., Azhari, N., Kaamin, M., & Hamid, N. B. (2019). Monitoring slope condition using UAV technology. *Civil Engineering and Architecture*. 7(6A), 1-6. DOI: 10.13189/cea.2019.071401
- Nikmehr, B., Hosseini, M. R., Martek, I., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2021). Digitalization as a strategic means of achieving sustainable efficiencies in construction management: A critical review. *Sustainability*, 13(9), 5040. <https://doi.org/10.3390/su13095040>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
- Ory, S., & Abraham, W. (1995). Knowledge-based system for construction planning of high-rise buildings. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(2), 172–182. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1995\)121:2\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1995)121:2(172))
- Oscar, L. H., Cerqueira, L. C., Cunha, P. H., & Qualharini, E. L. (2023). Generative Design in civil construction: A case study in Brazil. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1150767>
- Parascho, S. (2022). Construction robotic: From automation to collaboration. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 6(1), 183-204.
- Piroozfar, P., Farr, E. R., Essa, A., Boseley, S., & Jin, R. (2018). Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) in construction industry: An experiential development workflow. *The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-10)*.
- Rohani, M., Fan, M., & Yu, C. (2013). Advanced visualization and simulation techniques for Modern Construction Management. *Indoor and Built Environment*, 23(5), 665–674. <https://doi.org/10.1177/1420326x13498400>
- Sacks, R., & Goldin, M. (2007). Lean management model for construction of high-rise Apartment Buildings. *Journal of construction engineering and Management*, 133(5), 374-384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:5\(374\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:5(374))
- Sekiguchi, T., Honma, K., Mizutani, R., & Takagi, H. (1997). The development and application of an automatic building construction system using push-up machines. *Proceedings of the 14th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 321-328. <https://doi.org/10.22260/ISARC1997/0040>
- Shang, Z., & Shen, Z. (2017). Real-time 3D reconstruction on construction site using visual SLAM and UAV. *Construction Research Congress 2018*, 305-315.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sobeih, T., Salem, O., Genaidy, A., Abdelhamid, T., & Shell, R. (2009). Psychosocial factors and musculoskeletal disorders in the construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:4\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:4(267))
- Tjandra, K. D., Irawan, F. G., Nugraha, P., & Sunindijo, R. Y. (2022). Drone readiness in the Indonesian construction industry. *Construction Economics and Building*, 22(4), 36–58. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.874476939060499>
- Xu, X. & de Soto, G. B. (2020). On-site autonomous construction robots: A review of research areas, technologies, and suggestions for advancement. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 37, 385-392.
- Yoshida, T. (2006). A short history of construction robots research & development in a Japanese company. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 188-193.
- Yu, X. (2020). *Localization for autonomous construction vehicles using monocular camera and AprilTag* [Thesis, KTH Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1447361/FULLTEXT01.pdf>
- Zhang, K., Yan, J., & Chen, S-C. (2006). Automatic construction of building footprints from Airborne Lidar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9), 2523–2533. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2006.874137>