



## Optimalisasi Manajemen Proyek Konstruksi Berbasis Teknologi Digital: Studi Efisiensi Biaya dan Waktu pada Pembangunan Infrastruktur Perkotaan

### *Optimization of Construction Project Management Based on Digital Technology: A Study of Cost and Time Efficiency in Urban Infrastructure Development*

Marihot Manullang<sup>1</sup>, Rini<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universitas Lancang Kuning

<sup>2</sup>Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia

*Corresponding Author\**: [rinitapten@gmail.com](mailto:rinitapten@gmail.com)

#### Abstrak

Pembangunan infrastruktur perkotaan yang pesat di Indonesia menghadapi tantangan besar dalam hal efisiensi biaya dan waktu. Keterlambatan proyek dan pembengkakan anggaran menjadi permasalahan umum yang berdampak pada kualitas layanan publik dan keberlanjutan pembangunan kota. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penerapan teknologi digital dalam manajemen proyek konstruksi, dengan fokus pada upaya optimalisasi efisiensi biaya dan waktu. Studi ini menggunakan pendekatan campuran (mixed-method) dengan studi kasus pada dua proyek infrastruktur di wilayah metropolitan Indonesia yang telah mengimplementasikan Building Information Modeling (BIM), sistem manajemen proyek berbasis cloud, dan pemantauan menggunakan drone. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara mendalam, serta analisis dokumen proyek sebelum dan sesudah penerapan teknologi digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan teknologi digital mampu mempercepat waktu pelaksanaan proyek sebesar 18–23% dan menurunkan pemborosan biaya hingga 12–15%. Penerapan BIM terbukti efektif dalam mengurangi konflik desain, meningkatkan akurasi estimasi, dan mempercepat pengambilan keputusan. Selain itu, sistem monitoring real-time melalui drone dan cloud platform meningkatkan transparansi serta akuntabilitas selama siklus proyek berlangsung. Meskipun masih terdapat tantangan seperti keterbatasan kompetensi SDM dan resistensi terhadap perubahan teknologi, digitalisasi manajemen proyek terbukti menjadi solusi strategis dalam menghadapi kompleksitas pembangunan infrastruktur perkotaan modern. Rekomendasi diberikan untuk memperkuat kebijakan digitalisasi, pelatihan teknis, dan kolaborasi lintas sektor dalam rangka transformasi sektor konstruksi di Indonesia.

**Kata kunci:** Manajemen Proyek; Teknologi Digital; Efisiensi Biaya; Efisiensi Waktu; Infrastruktur Perkotaan.

#### Abstract

*The rapid development of urban infrastructure in Indonesia faces major challenges in terms of cost and time efficiency. Project delays and budget overruns are common problems that impact the quality of public services and the sustainability of urban development. This study aims to evaluate the application of digital technology in construction project management, with a focus on efforts to optimize cost and time efficiency. This study uses a mixed-method approach with case studies on two infrastructure projects in metropolitan areas of Indonesia that have implemented Building Information Modeling (BIM), a cloud-based project management system, and monitoring using drones. Data were obtained through field observations, in-depth interviews, and analysis of project documents before and after the implementation of*



*digital technology. The results of the study show that the use of digital technology can accelerate project implementation time by 18–23% and reduce cost waste by 12–15%. The application of BIM has proven effective in reducing design conflicts, increasing estimation accuracy, and accelerating decision making. In addition, the real-time monitoring system via drones and cloud platforms increases transparency and accountability throughout the project cycle. Although there are still challenges such as limited human resource competency and resistance to technological change, digitalization of project management has proven to be a strategic solution in dealing with the complexity of modern urban infrastructure development. Recommendations are provided to strengthen digitalization policies, technical training, and cross-sector collaboration in order to transform the construction sector in Indonesia.*

**Keywords:** Project Management; Digital Technology; Cost Efficiency; Time Efficiency; Urban Infrastructure

## **PENDAHULUAN**

Pembangunan infrastruktur perkotaan merupakan pilar utama dalam mendorong pertumbuhan ekonomi, meningkatkan konektivitas, dan memperkuat daya saing kota-kota di era globalisasi. Di Indonesia, percepatan pembangunan infrastruktur telah menjadi agenda prioritas nasional, sebagaimana tertuang dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020–2024 yang menekankan pentingnya infrastruktur dalam mendukung produktivitas dan pemerataan ekonomi (Bappenas, 2020). Namun demikian, dalam pelaksanaannya, proyek konstruksi infrastruktur sering menghadapi permasalahan klasik, seperti keterlambatan jadwal, pembengkakan anggaran, ketidakefisienan koordinasi, hingga kesalahan dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek.

Menurut data dari Kementerian PUPR (2022), sekitar 40% proyek infrastruktur di wilayah perkotaan Indonesia mengalami deviasi waktu dan biaya yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain keterbatasan sistem manajemen proyek konvensional, ketidaksesuaian data lapangan, serta lemahnya koordinasi antar pemangku kepentingan. Dalam konteks ini, transformasi digital menjadi keniscayaan untuk mengatasi persoalan-persoalan tersebut dan mengoptimalkan efisiensi dalam manajemen proyek konstruksi.

Teknologi digital seperti Building Information Modeling (BIM), sistem manajemen proyek berbasis cloud, Internet of Things (IoT), serta drone untuk pemantauan proyek, telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi dalam hal waktu, biaya, dan akurasi proyek (Azhar, 2011; Eastman et al., 2011). BIM, misalnya, memungkinkan semua pemangku kepentingan dalam proyek konstruksi untuk bekerja secara kolaboratif melalui model tiga dimensi yang terintegrasi dengan data estimasi biaya dan waktu, sehingga mampu mengurangi risiko kesalahan desain dan keterlambatan proyek (Hardin & McCool, 2015).

Selain itu, perkembangan teknologi cloud dan aplikasi manajemen proyek digital memungkinkan pengawasan waktu nyata (real-time monitoring), perencanaan adaptif, serta distribusi informasi yang cepat dan terkoordinasi, bahkan pada proyek berskala besar dan kompleks di area urban (Succar & Kassem, 2015). Di sisi lain, teknologi drone telah digunakan untuk pemetaan lahan, inspeksi struktur bangunan, dan pelaporan progres proyek, yang semuanya berkontribusi pada efisiensi pelaksanaan proyek (Zhao et al., 2020).

Namun, adopsi teknologi digital dalam industri konstruksi di Indonesia masih menghadapi hambatan, seperti keterbatasan kompetensi SDM, kurangnya integrasi sistem antar instansi, serta kendala biaya investasi awal (Gunawan et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan kajian empiris yang dapat mengukur sejauh mana penerapan teknologi digital dapat memberikan dampak terhadap efisiensi biaya dan waktu dalam pelaksanaan proyek

infrastruktur, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki karakteristik kompleks dan dinamis.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan teknologi digital dalam manajemen proyek konstruksi dan menganalisis dampaknya terhadap efisiensi biaya dan waktu dalam pembangunan infrastruktur perkotaan. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam perumusan kebijakan dan strategi transformasi digital di sektor konstruksi, serta menjadi acuan bagi para pelaku industri dalam mengoptimalkan pelaksanaan proyek secara berkelanjutan dan adaptif terhadap perkembangan zaman.

## **Kajian Pustaka**

### **1. Manajemen Proyek Konstruksi**

Manajemen proyek konstruksi merupakan serangkaian proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, pengawasan, dan pengendalian sumber daya untuk mencapai tujuan proyek dalam batasan waktu, biaya, kualitas, dan ruang lingkup tertentu (Kerzner, 2017). Dalam konteks pembangunan infrastruktur perkotaan yang kompleks, manajemen proyek memainkan peran krusial dalam menjamin agar proyek dapat berjalan efisien dan tepat sasaran.

Menurut Project Management Institute (PMI, 2021), proyek konstruksi memiliki karakteristik unik seperti kompleksitas teknis, variabilitas lokasi, serta keterlibatan berbagai pemangku kepentingan (stakeholder). Oleh karena itu, pendekatan manajemen proyek konvensional yang hanya mengandalkan metode manual dan komunikasi linier seringkali tidak memadai dalam menghadapi dinamika proyek modern.

### **2. Teknologi Digital dalam Konstruksi**

Perkembangan teknologi digital telah membuka paradigma baru dalam industri konstruksi. Digitalisasi mencakup penggunaan teknologi seperti Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), cloud computing, serta drone untuk mendukung berbagai tahapan proyek konstruksi, mulai dari perencanaan hingga pemeliharaan (Succar & Kassem, 2015; Azhar, 2011).

BIM merupakan salah satu teknologi paling revolusioner dalam konstruksi. BIM tidak hanya menyediakan model visual tiga dimensi, tetapi juga mengintegrasikan data teknis, biaya, jadwal, hingga siklus hidup bangunan dalam satu platform digital. Eastman et al. (2011) menjelaskan bahwa penggunaan BIM dapat meningkatkan kolaborasi antar tim, mengurangi konflik desain, serta mempercepat pengambilan keputusan di lapangan.

Penelitian oleh Bryde et al. (2013) juga membuktikan bahwa penerapan BIM berkontribusi terhadap penghematan biaya proyek sebesar 10–20% dan mempercepat waktu penyelesaian hingga 30%.

Selain BIM, teknologi drone digunakan secara luas untuk pemetaan topografi, inspeksi bangunan, dan monitoring progres proyek secara real-time. Drone terbukti mampu mengurangi kebutuhan inspeksi manual dan meningkatkan keamanan kerja di lapangan (Zhao et al., 2020). Sedangkan teknologi cloud-based project management systems mempermudah koordinasi tim proyek, memungkinkan pelaporan instan, serta memberikan akses data proyek secara terpadu dan aman (Ghosh & Niyogi, 2019).

### **3. Efisiensi Biaya dan Waktu dalam Proyek Konstruksi**

Efisiensi proyek merujuk pada kemampuan suatu proyek untuk mencapai output maksimal dengan input yang seminimal mungkin, baik dalam hal biaya maupun waktu. Dalam proyek konstruksi, efisiensi waktu berarti tercapainya target penyelesaian proyek sesuai jadwal, sedangkan efisiensi biaya mengacu pada pengeluaran proyek yang tidak melebihi anggaran yang telah direncanakan (Love et al., 2015).

Keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya masih menjadi masalah umum dalam industri konstruksi global. Penelitian oleh Doloi et al. (2012) di sektor infrastruktur menunjukkan bahwa keterlambatan proyek sering disebabkan oleh koordinasi yang buruk, perubahan desain di tengah proyek, serta lemahnya sistem pelaporan. Teknologi digital hadir sebagai solusi yang dapat meminimalisir kendala-kendala tersebut melalui otomatisasi alur kerja, peningkatan akurasi data, dan visibilitas proyek secara menyeluruh.

Implementasi sistem digital memungkinkan terjadinya deteksi dini terhadap potensi risiko keterlambatan atau overbudget melalui pemodelan skenario dan integrasi data waktu nyata (real-time). Dalam studi kasus oleh Khosrowshahi dan Arayici (2012), proyek yang menerapkan pendekatan digital dalam manajemen proyek mengalami peningkatan efisiensi hingga 25% dibanding proyek konvensional.

### **4. Tantangan Adopsi Teknologi Digital di Industri Konstruksi**

Walaupun manfaat teknologi digital telah banyak diakui, implementasinya tidak selalu berjalan mulus. Tantangan yang sering dihadapi antara lain adalah resistensi dari tenaga kerja terhadap perubahan sistem kerja, kurangnya keterampilan digital, biaya investasi awal yang tinggi, serta kurangnya regulasi pendukung (Gunawan et al., 2021).

Di Indonesia, adopsi teknologi digital pada sektor konstruksi masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan negara maju. Berdasarkan survei oleh McKinsey (2020), indeks

digitalisasi industri konstruksi Indonesia masih berada di bawah rata-rata Asia Tenggara. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan sistemik yang mencakup pelatihan SDM, insentif kebijakan, dan kolaborasi lintas sektor untuk mempercepat transformasi digital di bidang konstruksi.

## **METODOLOGI**

Metodologi penelitian berperan penting dalam menjamin validitas dan reliabilitas hasil studi, khususnya dalam konteks evaluasi penerapan teknologi digital pada manajemen proyek konstruksi. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah mixed-method, yaitu kombinasi antara pendekatan kuantitatif dan kualitatif, yang dirancang untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai dampak digitalisasi terhadap efisiensi biaya dan waktu pada proyek infrastruktur perkotaan (Creswell & Plano Clark, 2018).

### **1. Desain Penelitian**

Desain penelitian ini bersifat deskriptif-analitis dengan studi kasus terfokus pada dua proyek infrastruktur perkotaan berskala besar yang telah menerapkan teknologi digital secara signifikan. Penelitian dilakukan secara lapangan (field study) dengan mengumpulkan data primer melalui observasi dan wawancara, serta data sekunder dari dokumen proyek dan laporan manajemen. Tujuan dari desain ini adalah untuk menggali dampak konkret dari implementasi teknologi digital dalam konteks manajemen proyek konstruksi, khususnya terhadap parameter waktu dan biaya (Yin, 2018).

### **2. Lokasi dan Objek Penelitian**

Objek penelitian difokuskan pada dua proyek pembangunan infrastruktur perkotaan di wilayah metropolitan Indonesia:

- a. Proyek pembangunan underpass dan jembatan di Jakarta Selatan.
- b. Proyek renovasi dan perluasan gedung pemerintahan di Kota Bandung.

Kedua proyek ini dipilih karena telah mengimplementasikan teknologi *Building Information Modeling* (BIM), drone monitoring, serta sistem manajemen proyek berbasis *cloud platform*.

### **3. Teknik Pengumpulan Data**

Penelitian ini menggunakan teknik pengumpulan data berikut:

- a. **Wawancara mendalam (*in-depth interview*)**

Dilakukan terhadap manajer proyek, koordinator teknis, perencana, dan operator BIM. Tujuannya adalah untuk menggali persepsi, pengalaman, serta tantangan dalam mengaplikasikan teknologi digital selama proyek berlangsung.

b. **Observasi partisipatif**

Pengamatan langsung dilakukan di lokasi proyek untuk mencatat alur kerja, pemanfaatan teknologi, serta dokumentasi visual (foto dan video) terkait aktivitas digitalisasi dalam proyek.

c. **Analisis dokumen**

Data kuantitatif dikumpulkan dari laporan baseline proyek (rencana awal) dan realisasi aktual waktu serta biaya. Data tersebut digunakan untuk membandingkan efektivitas proyek sebelum dan sesudah digitalisasi.

#### **4. Teknik Analisis Data**

Data dianalisis dengan pendekatan analisis komparatif dan kontekstual. Analisis komparatif digunakan untuk menghitung perbedaan efisiensi waktu dan biaya antara fase pra-digital dan pasca-digital (Kothari, 2004). Indikator yang digunakan antara lain:

- a. Durasi aktual proyek dibandingkan dengan rencana awal.
- b. Realisasi anggaran dibandingkan dengan estimasi awal.
- c. Jumlah revisi desain atau instruksi kerja selama pelaksanaan.

Sementara itu, analisis kontekstual digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor pendukung dan penghambat dari hasil wawancara dan observasi, melalui metode **coding tematik** (Miles, Huberman, & Saldaña, 2014). Temuan kemudian dikaitkan dengan teori dan kerangka kerja manajemen proyek digital.

#### **5. Validitas dan Triangulasi Data**

Untuk menjaga validitas internal dan eksternal, dilakukan triangulasi sumber data, yaitu dengan membandingkan hasil wawancara, observasi, dan dokumen proyek. Validasi juga dilakukan melalui member check, yakni mengkonfirmasi temuan penelitian kepada informan untuk memastikan akurasi interpretasi data (Patton, 2002).

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana penerapan teknologi digital dalam manajemen proyek konstruksi berdampak terhadap efisiensi biaya dan waktu, khususnya pada pembangunan infrastruktur perkotaan. Data dikumpulkan dari dua studi kasus proyek di Jakarta dan Bandung, yang masing-masing telah menerapkan Building

Information Modeling (BIM), drone monitoring, serta platform manajemen proyek berbasis cloud. Berdasarkan hasil analisis kualitatif dan kuantitatif, ditemukan sejumlah temuan utama yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi proyek setelah implementasi teknologi digital.

### **1. Efisiensi Waktu Pelaksanaan Proyek**

Implementasi teknologi digital terbukti mempercepat pelaksanaan proyek. Pada proyek underpass di Jakarta, durasi proyek dipersingkat dari rencana awal 18 bulan menjadi 14,5 bulan (penghematan waktu sebesar 19,4%). Sedangkan pada proyek gedung pemerintahan di Bandung, percepatan waktu mencapai 23% dari target awal. Penyebab utama efisiensi ini adalah adanya koordinasi yang lebih efektif, visualisasi pekerjaan yang lebih jelas melalui BIM, serta pelacakan progres harian melalui drone dan aplikasi monitoring.

Menurut Eastman et al. (2011), visualisasi 3D dalam BIM memungkinkan identifikasi potensi konflik desain sejak tahap awal, sehingga menghindari keterlambatan akibat revisi di tengah proyek. Hal ini dikonfirmasi oleh responden lapangan yang menyebutkan bahwa konflik antar komponen bangunan dapat diselesaikan sebelum konstruksi fisik dimulai, berkat simulasi digital yang interaktif.

Selain itu, penggunaan platform manajemen proyek digital seperti Autodesk Construction Cloud dan Asana Construction memungkinkan pengiriman notifikasi instan kepada tim kerja dan pemangku kepentingan, yang mempercepat proses pengambilan keputusan (Ghosh & Niyogi, 2019). Kecepatan komunikasi dan respons terhadap isu lapangan menjadi salah satu faktor utama penghematan waktu proyek.

### **2. Efisiensi Biaya Proyek**

Dari sisi efisiensi biaya, terdapat penghematan anggaran rata-rata sebesar 12–15% dibandingkan dengan estimasi awal. Pada proyek di Jakarta, anggaran awal sebesar Rp 72 miliar dapat direalisasikan hanya dengan Rp 62,5 miliar, sementara proyek di Bandung mengalami penghematan sebesar Rp 7,3 miliar. Penghematan ini sebagian besar berasal dari:

- a. Pengurangan pekerjaan ulang (rework) akibat kesalahan desain,
- b. Optimalisasi penggunaan material dengan data BIM,
- c. Efisiensi tenaga kerja melalui jadwal kerja berbasis aplikasi.

Penelitian oleh Bryde et al. (2013) menunjukkan bahwa penerapan BIM dan sistem informasi konstruksi lainnya mampu mengurangi biaya proyek hingga 20% melalui peningkatan efisiensi operasional dan manajemen risiko.

Penerapan drone juga berperan dalam penghematan biaya inspeksi dan dokumentasi, karena pengawasan dapat dilakukan dengan lebih akurat dan cepat tanpa harus mengganggu aktivitas proyek di lapangan (Zhao et al., 2020).

### **3. Peningkatan Transparansi dan Akuntabilitas**

Salah satu dampak positif dari digitalisasi proyek adalah meningkatnya transparansi dan akuntabilitas. Semua aktivitas proyek terdokumentasi secara otomatis dan tersimpan dalam server cloud, sehingga setiap revisi, keputusan teknis, atau perubahan jadwal dapat ditelusuri dengan mudah. Hal ini sangat penting dalam konteks proyek publik yang memerlukan akuntabilitas kepada masyarakat dan lembaga pengawas.

Menurut Succar & Kassem (2015), digitalisasi sistem dokumentasi proyek menjadi fondasi penting dalam manajemen konstruksi modern karena memungkinkan pelaporan kinerja berbasis data real-time dan mengurangi potensi penyalahgunaan anggaran atau manipulasi data proyek.

### **4. Tantangan Implementasi Teknologi Digital**

Meski hasil menunjukkan banyak manfaat, penelitian ini juga menemukan beberapa tantangan dalam penerapan teknologi digital:

- a. **Keterbatasan kompetensi SDM**, terutama dalam penguasaan perangkat lunak BIM dan sistem monitoring proyek digital;
- b. **Biaya awal investasi teknologi** yang tinggi, terutama untuk pelatihan dan infrastruktur digital;
- c. **Resistensi budaya kerja**, di mana sebagian pekerja dan manajer lapangan masih terbiasa dengan sistem manual.

Gunawan et al. (2021) menegaskan bahwa salah satu hambatan utama transformasi digital di sektor konstruksi Indonesia adalah minimnya integrasi antara teknologi dan kebijakan kelembagaan. Oleh karena itu, selain adopsi teknologi, transformasi budaya organisasi dan pelatihan sumber daya manusia menjadi aspek yang tak terpisahkan.

### **5. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya**

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan-temuan sebelumnya, seperti yang dikemukakan oleh Khosrowshahi & Arayici (2012), yang menyatakan bahwa adopsi BIM

dan digitalisasi dalam proyek konstruksi dapat meningkatkan efisiensi proyek hingga 25% secara keseluruhan. Namun, perbedaan dalam konteks Indonesia adalah pada aspek kesiapan infrastruktur digital dan kebutuhan penguatan regulasi nasional.

## **KESIMPULAN DAN SARAN**

### **1. Kesimpulan**

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi digital dalam manajemen proyek konstruksi memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi biaya dan waktu pada pembangunan infrastruktur perkotaan. Berdasarkan hasil studi kasus pada dua proyek di Jakarta dan Bandung, dapat disimpulkan bahwa:

- a. **Penggunaan Building Information Modeling (BIM)** berkontribusi besar dalam mengurangi konflik desain, meningkatkan akurasi estimasi, dan memfasilitasi kolaborasi lintas disiplin secara simultan. BIM memungkinkan simulasi proyek secara visual dan sistematis, sehingga mencegah keterlambatan dan revisi yang tidak perlu (Eastman et al., 2011; Bryde et al., 2013).
- b. **Penggunaan drone dan teknologi monitoring berbasis cloud** mempercepat proses pengambilan keputusan serta memudahkan pelaporan dan pengawasan proyek secara real-time. Hal ini secara langsung mempercepat waktu pelaksanaan proyek dan mengurangi biaya operasional di lapangan (Zhao et al., 2020).
- c. Secara kuantitatif, proyek yang menerapkan teknologi digital menunjukkan penghematan biaya antara **12-15%** dan efisiensi waktu pelaksanaan sebesar **18-23%** dibandingkan metode konvensional. Ini sejalan dengan penelitian Ghosh & Niyogi (2019) yang menyebut bahwa sistem manajemen proyek digital mampu meningkatkan efisiensi kerja hingga 25%.
- d. **Tantangan implementasi teknologi digital** di lapangan masih mencakup keterbatasan sumber daya manusia dalam penguasaan teknologi, resistensi budaya kerja terhadap digitalisasi, serta kendala biaya awal implementasi. Hal ini sejalan dengan temuan Gunawan et al. (2021) yang menegaskan bahwa digitalisasi di sektor konstruksi Indonesia memerlukan pendekatan sistemik, meliputi kebijakan, pelatihan, dan dukungan infrastruktur.

Secara keseluruhan, digitalisasi manajemen proyek tidak hanya menjadi tren, tetapi kebutuhan strategis dalam menjawab tantangan pembangunan perkotaan yang semakin kompleks, dinamis, dan menuntut efisiensi tinggi. Teknologi digital terbukti mampu meningkatkan transparansi, akuntabilitas, dan akurasi keputusan dalam proyek konstruksi skala besar.

## 2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran strategis yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

- a. **Pemerintah dan institusi publik** perlu memberikan dukungan regulatif dan insentif fiskal untuk mendorong digitalisasi proyek konstruksi. Kebijakan ini dapat berupa kewajiban penerapan BIM pada proyek publik tertentu, subsidi pelatihan digital bagi tenaga kerja konstruksi, serta pengadaan sistem manajemen proyek berbasis cloud nasional.
- b. **Pengembang proyek dan kontraktor** harus melakukan investasi berkelanjutan dalam peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan BIM, manajemen data proyek digital, dan literasi teknologi lainnya. Transformasi digital tidak akan berhasil tanpa kesiapan SDM sebagai elemen kunci (Creswell & Plano Clark, 2018).
- c. **Institusi pendidikan dan pelatihan teknis** di bidang teknik sipil, arsitektur, dan manajemen proyek perlu memasukkan kurikulum terkait teknologi konstruksi digital secara lebih sistematis dan praktis, agar lulusan siap menghadapi kebutuhan industri.
- d. **Penelitian lanjutan** perlu dilakukan dengan cakupan yang lebih luas, termasuk pada proyek-proyek berskala menengah dan kecil, untuk melihat dinamika penerapan teknologi digital pada berbagai konteks dan jenis infrastruktur.

Dengan mengadopsi pendekatan digital secara sistemik, pembangunan infrastruktur di kawasan perkotaan Indonesia dapat dilakukan dengan lebih efisien, transparan, dan berkelanjutan selaras dengan tuntutan global dan agenda transformasi digital nasional.

## DAFTAR PUSTAKA

- Azhar, S. (2011). *Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry*. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Bappenas. (2020). *Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020–2024*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Bappenas.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The Project Benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Doloi, H., Sawhney, A., Iyer, K. C., & Rentala, S. (2012). Analysing Factors Affecting Delays in Indian Construction Projects. *International Journal of Project Management*, 30(4), 479–489.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. John Wiley & Sons.
- Ghosh, S., & Niyogi, R. (2019). Cloud-Based Construction Management Systems: Enhancing Communication and Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(3), 05019001.
- Gunawan, H., Raharjo, K., & Adiwibowo, S. (2021). *Adopsi Teknologi Digital di Industri Konstruksi: Hambatan dan Strategi Implementasi*. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 9(2), 111–120.
- Hardin, B., & McCool, D. (2015). *BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows*. John Wiley & Sons.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). (2022). *Laporan Tahunan Pembangunan Infrastruktur Tahun 2021*.
- Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. John Wiley & Sons.
- Khosrowshahi, F., & Arayici, Y. (2012). Roadmap for Implementation of BIM in the UK Construction Industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 610–635.
- Kothari, C. R. (2004). *Research Methodology: Methods and Techniques* (2nd ed.). New Age International.
- Love, P. E. D., Sing, C. P., Wang, X., & Irani, Z. (2015). Overruns in Transportation Infrastructure Projects. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(5), 834–845.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Patton, M. Q. (2002). *Qualitative Research and Evaluation Methods* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Project Management Institute (PMI). (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – 7th Edition*. PMI.
- Succar, B., & Kassem, M. (2015). *Macro-BIM Adoption: Conceptual Structures*. *Automation in Construction*, 57, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018>

- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). SAGE
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The Project Benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Zhao, X., Hwang, B.-G., & Yu, G. (2020). *Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Construction: A Review*. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9), 2443–2461.