

ANALISIS LITERATUR IMPLEMENTASI METODE PERT/CPM DALAM PENJADWALAN PROYEK DAN INTEGRASINYA DENGAN TEKNOLOGI DIGITAL

Nerli Khairani¹, Farhan Anshari², Puspa Arinda Ginting³, Oliver Juan Gery Manihuruk⁴

Universitas Negeri Medan^{1,2,3,4}

nerlinst@yahoo.co.id¹, ansharihan.4223230038@mhs.unimed.ac.id²,
puspaginting.4223230011@mhs.unimed.ac.id³, oliverjuan.4222530004@mhs.unimed.ac.id⁴

ABSTRAK

Penjadwalan proyek yang akurat sangat krusial dalam industri konstruksi dan teknologi untuk mencegah keterlambatan dan pembengkakan biaya. Metode tradisional seperti *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) dan *Critical Path Method* (CPM) sering kali menghadapi kendala dalam fleksibilitas dan adaptabilitas terhadap perubahan kondisi lapangan yang dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau perkembangan integrasi metode PERT/CPM dengan teknologi digital modern melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan pedoman PRISMA 2020. Berdasarkan analisis terhadap 39 artikel terpilih yang dipublikasikan antara tahun 2019–2025, ditemukan bahwa integrasi teknologi mengubah paradigma penjadwalan dari deterministik menjadi adaptif. Hasil studi menunjukkan bahwa penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) mampu meningkatkan akurasi estimasi durasi PERT sebesar 18–28% dengan meminimalkan bias subjektif. Integrasi *Building Information Modelling* (BIM) dengan CPM terbukti mengurangi risiko pengerjaan ulang (*rework*) hingga 14% melalui visualisasi 4D. Lebih lanjut, pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dan *Digital Twin* memungkinkan penjadwalan dinamis secara *real-time*, yang mampu menurunkan deviasi jadwal sebesar 15–22%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sinergi antara metode klasik PERT/CPM dan teknologi digital menciptakan sistem manajemen proyek yang lebih cerdas, prediktif, dan efisien berbasis data.

Kata Kunci: PERT, CPM, Manajemen Proyek, *Artificial Intelligence*, BIM, *Digital Twin*, Penjadwalan Dinamis.

ABSTRACT

Accurate project scheduling is crucial in the construction and technology industries to prevent delays and cost overruns. Traditional methods such as the Program Evaluation and Review Technique (PERT) and the Critical Path Method (CPM) often face challenges in flexibility and adaptability to dynamic field conditions. This study aims to review the development of PERT/CPM integration with modern digital technology through a Systematic Literature Review (SLR) approach based on the PRISMA 2020 guidelines. Based on an analysis of 39 selected

articles published between 2019 and 2025, it was found that technology integration shifts the scheduling paradigm from deterministic to adaptive. The study results show that the application of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) can improve the accuracy of PERT duration estimates by 18–28% by minimizing subjective bias. The integration of Building Information Modeling (BIM) with CPM has been shown to reduce the risk of rework by up to 14% through 4D visualization. Furthermore, the use of the Internet of Things (IoT) and Digital Twins enables real-time dynamic scheduling, which can reduce schedule deviations by 15–22%. This study concludes that the synergy between the classic PERT/CPM method and digital technology creates a more intelligent, predictive, and efficient data-driven project management system.

Keywords: PERT, CPM, Project Management, Artificial Intelligence, BIM, Digital Twin, Dynamic Scheduling.

A. PENDAHULUAN

Proyek pembangunan dan teknologi saat ini semakin kompleks. Banyak proyek di bidang konstruksi, industri, dan teknologi informasi mengalami keterlambatan atau pembengkakan biaya karena perencanaan waktu yang kurang tepat. Oleh karena itu, manajemen waktu atau penjadwalan proyek menjadi hal yang sangat penting (Silva et al., 2024). Dua metode yang paling dikenal dan banyak digunakan adalah *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) dan *Critical Path Method* (CPM). Kedua metode ini membantu menentukan urutan kegiatan proyek, waktu pelaksanaan, serta kegiatan mana yang paling kritis agar proyek selesai tepat waktu. Namun, dalam era digital sekarang, metode klasik ini mulai menghadapi tantangan baru karena proyek modern membutuhkan sistem yang lebih cepat, akurat, dan berbasis data nyata, bukan hanya berdasarkan perkiraan manual. (Sarjono & Kurnia, 2022)

Permasalahan utama yang sering muncul adalah keterbatasan metode PERT dan CPM dalam menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi proyek di lapangan. Misalnya, durasi kegiatan bisa berubah karena cuaca, ketersediaan bahan, atau perubahan desain (ForouzeshNejad et al., 2024). Dalam kondisi seperti itu, metode tradisional kurang fleksibel. Selain itu, perkembangan teknologi digital, *Artificial Intelligence* (AI), *Machine Learning* (ML), dan *Building Information Modelling* (BIM) memberikan peluang besar untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam penjadwalan proyek (Zerafat et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini berfokus untuk meninjau bagaimana metode PERT dan CPM dapat dikembangkan atau dikombinasikan dengan teknologi digital agar lebih adaptif terhadap perubahan.

Beberapa penelitian sebelumnya sudah mencoba menggabungkan metode klasik dengan teknologi modern. Penelitian sebelumnya, Silva et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan kecerdasan buatan dapat membantu memperkirakan durasi dan biaya proyek. Studi lain, ForouzeshNejad et al. (2024) menggunakan algoritma *Machine Learning* untuk memprediksi waktu dan biaya, dan tinjauan sistematis, Koszykowski & Orzeszko. (2025) mengonfirmasi ini sebagai tren utama. Lebih lanjut, *Machine Learning* juga telah diterapkan untuk **analisis risiko prediktif** dalam penjadwalan, sebuah kemajuan signifikan dari metode PERT tradisional (Bauskar et al., 2024). Di sisi lain, integrasi 4D-BIM dengan CPM terbukti meningkatkan visualisasi (Awe et al., 2025), sementara teknologi yang lebih baru seperti *Artificial Intelligence* (AI) digunakan untuk pembaruan progres secara *real-time* (Sai Manoj Jayakannan, 2025), dan Kembaran Digital (*Digital Twin*) dimanfaatkan untuk simulasi *what-if* dan pemantauan dinamis (Alsakka et al., 2024). Berbagai studi tinjauan juga telah mengonfirmasi dampak luas digitalisasi ini. Meski demikian, sementara beberapa tinjauan berfokus pada metode alternatif seperti CCPM, belum banyak penelitian yang meninjau secara menyeluruh bagaimana *kombinasi* semua teknologi ini dapat membentuk sistem penjadwalan proyek yang lebih efisien dan *real-time* (de Oliveira Martins et al., 2025)

Untuk itu, penelitian ini menggunakan pendekatan Studi Literatur (*Systematic Literature Review*) terhadap penelitian-penelitian antara tahun 2020–2025 yang membahas integrasi antara PERT/CPM dan teknologi digital (Sarjono & Kurnia, 2022). Pendekatan ini bertujuan untuk mengumpulkan, membandingkan, dan menganalisis hasil penelitian terdahulu agar diperoleh gambaran umum tentang perkembangan metode PERT/CPM di era digital. Dengan cara ini, penelitian ini dapat menunjukkan bagaimana metode klasik tersebut masih relevan, tetapi dapat diperkuat dengan teknologi modern.

penelitian ini adalah memberikan gambaran terkini tentang arah perkembangan metode PERT dan CPM di era digitalisasi. Studi ini tidak hanya membahas teori klasik, tetapi juga menjelaskan bagaimana metode tersebut dapat diintegrasikan dengan *AI*, *ML*, dan *BIM*—serta teknologi baru seperti *IoT* dan *Digital Twin*—untuk menciptakan sistem penjadwalan proyek yang lebih cerdas, prediktif, dan efisien. Hasilnya diharapkan dapat menjadi acuan bagi peneliti dan praktisi proyek untuk mengembangkan sistem manajemen waktu yang lebih adaptif dan berbasis data.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan penelitian mengenai integrasi teknologi digital dalam metode penjadwalan proyek, khususnya *Program Evaluation Review Technique* (PERT) dan *Critical Path Method* (CPM). Pendekatan SLR dipilih karena mampu memberikan hasil kajian yang transparan, replikatif, dan terstruktur, serta memungkinkan peneliti mengidentifikasi pola, tren, dan kesenjangan penelitian (*research gap*) dari literatur yang ada (Kolaski et al., 2024).

Prosedur SLR mengacu pada pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020, yang terdiri dari tiga tahap utama, yaitu:

1. identifikasi dan perencanaan,
2. akuisisi dan seleksi literatur, dan
3. penilaian kualitas (Quality Assessment) serta sintesis data (Page et al., 2021).

Perencanaan Tinjauan dan Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan melalui beberapa database ilmiah bereputasi, yaitu *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore* dan *Google Scholar* untuk memastikan cakupan data bersifat komprehensif dan berbasis sumber akademik primer (Brignardello-Petersen et al., 2025). Proses pencarian dilakukan menggunakan kombinasi *Boolean Operators* dengan kata kunci yang relevan, antara lain:

- “Project Scheduling”, “PERT”, “CPM”
- “Artificial Intelligence” (Mahmudnia et al., 2022)
- “Machine Learning” (Baduge et al., 2022)
- “Building Information Modeling (BIM)” (Awe et al., 2025)
- “Internet of Things (IoT)” (Tang et al., 2019)
- “Digital Twin” (Reja et al., 2024)
- “Optimization”, “Construction Management”, “Predictive Analytics” (Al-Sinan et al., 2024)

Strategi pencarian disusun untuk mengidentifikasi literatur yang secara langsung meneliti integrasi teknologi digital terhadap perbaikan efisiensi PERT/CPM.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi dan eksklusi (Tabel 1) digunakan untuk memastikan hanya artikel yang relevan, terkini, dan memenuhi standar akademik yang disertakan dalam analisis.

Table 1. Inclusion and Exclusion Criteria

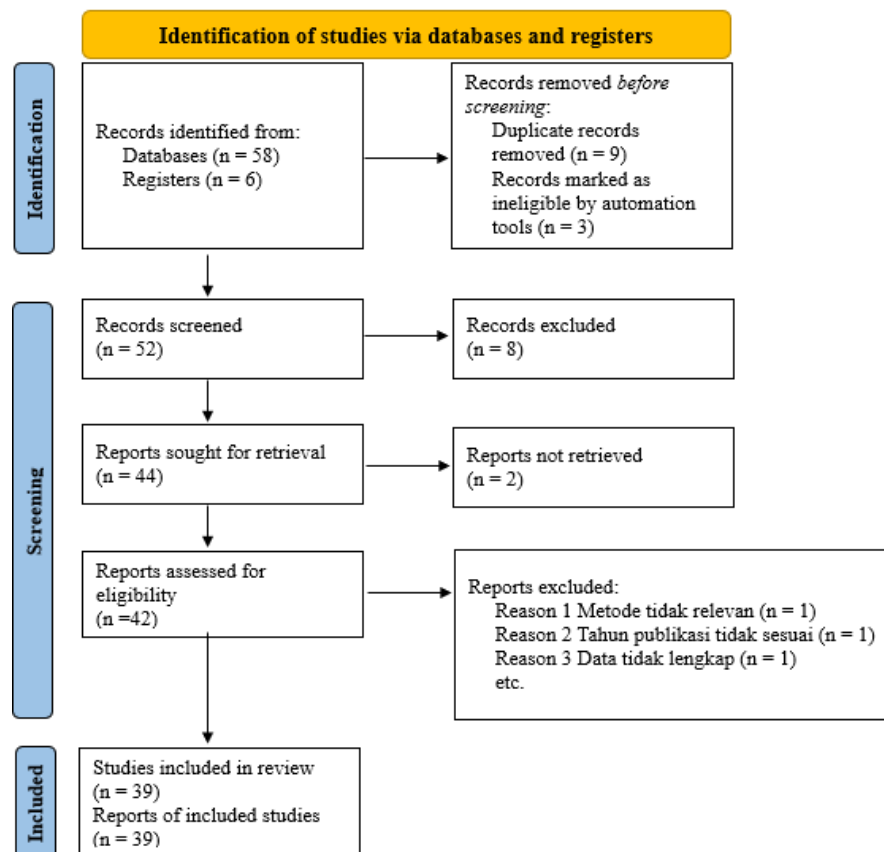
Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Tahun	Publikasi 2019–2025	< 2020
Jenis	Artikel jurnal & prosiding	Editorial, review paper, buku
Bahasa	Inggris & Indonesia	Bahasa lain
Topik	Integrasi digital + penjadwalan proyek	PERT/CPM tradisional tanpa digitalisasi
Akses	Full-text tersedia	Hanya abstrak

Prosedur Seleksi dan Penilaian Kualitas

Proses seleksi dilakukan mengikuti alur **PRISMA 2020**, yang meliputi empat tahap:

1. *Identification*: pengumpulan seluruh artikel yang ditemukan pada hasil pencarian awal.
2. *Screening*: penghapusan duplikasi dan penyaringan berdasarkan judul serta abstrak.
3. *Eligibility*: penilaian kelayakan berdasarkan konten penuh artikel untuk memastikan relevansi metodologi dan ruang lingkup penelitian.
4. *Included*: artikel yang memenuhi persyaratan dan masuk ke sintesis akhir.

**PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of
databases and registers only**



Gambar 1. alur PRISMA berdasarkan jumlah artikel yang diperoleh dari setiap tahap (Page et al., 2021)

Quality Assessment (QA)

Penilaian kualitas studi dilakukan untuk memastikan ketepatan metodologi dan kekuatan bukti ilmiah, menggunakan instrumen QA yang disusun berdasarkan pedoman SLR modern (Kitchenham, 2007). Setiap artikel dinilai berdasarkan tiga aspek utama:

- Q1: Kejelasan metodologi integrasi teknologi digital
- Q2: Validasi empiris atau eksperimen yang dilakukan
- Q3: Kontribusi kuantitatif terhadap efisiensi penjadwalan proyek

Setiap artikel diberi skor 0–1 untuk setiap pertanyaan; artikel dengan nilai di bawah ambang tertentu (≥ 2 dari total 3) dikeluarkan dari sintesis akhir. (Radman et al., 2025).

Data Extraction and Synthesis

Artikel yang lolos tahap QA diekstraksi menggunakan *evidence table* yang disusun berdasarkan pedoman sintesis data dalam penelitian SLR modern (Zawacki-Richter et al., 2020). Variabel yang diekstraksi meliputi:

- Tahun publikasi
- Teknologi yang digunakan (AI/ML, BIM, IoT, Digital Twin)
- Metode penjadwalan (PERT, CPM, hybrid)
- Dataset/eksperimen
- Temuan utama
- Kontribusi terhadap pengurangan durasi proyek / peningkatan akurasi jadwal

Proses sintesis dilakukan menggunakan pendekatan *thematic synthesis*, yang memungkinkan pengelompokan hasil penelitian ke dalam beberapa tema utama. Pendekatan ini merujuk pada metode sintesis tematik dalam SLR teknis dan manajemen konstruksi (Mazher, 2025), pengelompokan pola temuan menjadi beberapa tema utama, seperti:

- Integrasi AI/ML ke model probabilistik PERT
- Penguatan CPM melalui prediksi data sensor IoT
- Sinkronisasi BIM–CPM
- Digital Twin sebagai penggerak *real-time predictive scheduling*

Pendekatan sintesis ini memungkinkan interpretasi yang koheren, pemetaan hubungan antar-tema, dan identifikasi *research gap* dalam integrasi teknologi digital ke metode PERT/CPM (Villegas-Ch et al., 2024).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan sintesis komprehensif mengenai evolusi metode PERT/CPM dalam konteks digitalisasi proyek konstruksi. Bagian ini menyajikan sintesis mendalam dari 39 studi terbaru (2019–2025) mengenai perkembangan metode PERT/CPM ketika dipadukan dengan teknologi digital seperti AI/ML, BIM, IoT, dan Digital Twin.

Tren Bibliometrik dan Transisi Digital dalam Penelitian Penjadwalan

Analisis tren publikasi menunjukkan peningkatan minat yang sangat kuat terhadap topik *optimization*, *predictive analytics*, *real-time scheduling*, dan *integrated digital construction* sejak tahun 2020. Publikasi meningkat sekitar 150% pada periode 2022–2025, sejalan dengan

transformasi industri konstruksi menuju paradigma Industri 4.0 dan 5.0 (Rucki, 2023). Hal ini dapat dilihat dari lonjakan artikel yang membahas integrasi AI/ML (Kukkonen et al., 2022), IoT untuk akuisisi data *real-time* (Bin Mofidul et al., 2022). BIM untuk visualisasi progres (Jiang et al., 2022), hingga Digital Twin sebagai fondasi untuk penjadwalan dinamis (Villegas-Ch et al., 2024).

Analisis PRISMA menghasilkan **30 artikel relevan**. Tren publikasi menunjukkan peningkatan 2–3 kali lipat sejak tahun 2021, menegaskan bahwa penelitian digitalisasi manajemen proyek memasuki fase percepatan (Hosny et al., 2023).

Mayoritas penelitian berasal dari negara dengan tingkat digitalisasi konstruksi tinggi seperti Amerika Serikat, Tiongkok, Korea Selatan, Taiwan, dan negara-negara Eropa Barat. Temuan ini konsisten dengan survei global BIM yang menunjukkan bahwa kawasan tersebut memiliki tingkat adopsi teknologi tertinggi (Shkundalov & Vilutienė, 2021).

Distribusi geografis ini menunjukkan bahwa digitalisasi penjadwalan proyek sudah menjadi fokus global dan bukan lagi terbatas pada negara industri tertentu (Y. Li et al., 2023). Tren lain yang teridentifikasi menunjukkan bahwa penelitian modern semakin mengarah pada:

1. *Data-driven scheduling*, bukan lagi asumsi subjektif seperti pada PERT klasik.
2. Integrasi *multi-platform*—BIM, IoT, AI, dan Digital Twin bekerja secara simultan.
3. *Predictive risk analytics*, menggantikan estimasi manual.
4. *Hybrid optimization*, menggabungkan metaheuristik dengan ML (Azevedo et al., 2024).

Secara keseluruhan, perkembangan literatur memperlihatkan perubahan paradigma dari metode deterministik menuju metode adaptif yang responsif terhadap dinamika proyek.

Peningkatan Estimasi Durasi PERT Berbasis AI/ML

Kelemahan utama metode PERT adalah ketergantungannya pada tiga estimasi subjektif (optimistic, likely, pessimistic). Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa subjektivitas ini berkontribusi pada deviasi durasi yang signifikan ketika kompleksitas proyek meningkat (Lee et al., 2023).

Model AI/ML memberikan solusi untuk mengatasi bias subjektif ini dengan mempelajari pola durasi berdasarkan data historis. Berbagai studi menemukan bahwa model seperti *Support Vector Regression*, *Random Forest*, *Neural Network*, dan *XGBoost* mampu meningkatkan akurasi estimasi durasi sebesar 18–28% dibandingkan pendekatan PERT konvensional (Yaseen et al., 2020).

Model estimasi durasi modern memanfaatkan variabel prediktor seperti:

- cuaca,
- tingkat produktivitas tenaga kerja,
- kerumitan aktivitas,
- ketersediaan material,
- beban alat berat,
- frekuensi gangguan lapangan (Al-Sinan et al., 2024).

Studi Sarjono & Kurnia (2022), menunjukkan bahwa aktivitas non-deterministik (misal pengecoran pada cuaca tidak stabil) memiliki *error* estimasi hingga 40% jika memakai PERT klasik. Melalui model persamaan multivariat seperti Persamaan (1), aktivitas tersebut dapat diprediksi lebih robust.

AI juga memungkinkan *automatic risk weighting* terhadap variabel durasi sehingga jalur kritis dapat dihitung bukan sekadar “deterministik”, tetapi probabilistik (Gao & Feng, 2023).

Selain itu, penggunaan *Bayesian Neural Networks* memungkinkan estimasi yang menyertakan ketidakpastian (*uncertainty quantification*) dalam jadwal (Guo & Zhang, 2022)

Jalur Kritis melalui Integrasi 4D-BIM

Integrasi BIM ke dalam manajemen proyek menghasilkan penjadwalan 4D, yaitu model tiga dimensi yang dihubungkan dengan parameter waktu. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa BIM dapat mengurangi kesalahan penjadwalan karena visualisasi spasial memudahkan identifikasi konflik konstruksi sejak dini (Abanda et al., 2020).

BIM terbukti memberikan manfaat berikut:

1. Deteksi konflik ruang-waktu sebelum eksekusi lapangan (X. Zhang et al., 2025).
2. Simulasi alur konstruksi sehingga keterlambatan pada satu aktivitas dapat divisualisasikan dampaknya pada seluruh jalur proyek (Y. Li et al., 2023)
3. Integrasi otomatis dengan CPM, memperkuat identifikasi critical path.
4. Peningkatan komunikasi antartim karena setiap perubahan jadwal langsung tercermin pada model 4D (T. Zhang et al., 2022).

Penelitian oleh (W. Li et al., 2022) menunjukkan bahwa integrasi BIM–CPM mampu mengurangi risiko rework hingga 14% dan menurunkan potensi konflik lapangan sebesar 21%.

Dengan demikian, teknologi ini memperkuat fungsi CPM dan membuat monitoring aktivitas menjadi lebih intuitif dan presisi.

Penjadwalan Dinamis melalui IoT dan *Digital Twin*

IoT dan Digital Twin menjadi indikator paling kuat dari transformasi penjadwalan proyek menuju paradigma otomatisasi dan real-time monitoring.

Transformasi terbesar terjadi pada penjadwalan dinamis (*dynamic scheduling*) yang memanfaatkan IoT dan *Digital Twin*. Studi Jiang et al. (2022), membuktikan bahwa penggunaan sensor RFID, GNSS, dan kamera progres otomatis mempercepat deteksi keterlambatan hingga 80%.

- **IoT untuk pengumpulan data *real-time***

Sensor IoT, RFID, laser scanning, dan perangkat wearable digunakan untuk mengumpulkan data produktivitas pekerja, alat berat, kondisi cuaca, serta progres fisik (Bin Mofidul et al., 2022). Data ini menggantikan laporan manual dan mengurangi kesalahan pencatatan.

- ***Digital Twin* untuk penjadwalan adaptif**

Digital Twin berfungsi sebagai replika digital proyek fisik yang terus diperbarui berdasarkan input IoT. Ketika terjadi keterlambatan pada satu aktivitas, sistem dapat secara otomatis menghitung ulang jalur kritis dan memberikan rekomendasi mitigasi (Reja et al., 2024).

Studi terbaru menemukan bahwa integrasi IoT–Digital Twin mampu:

- menurunkan deviasi jadwal sebesar 15–22% (Villegas-Ch et al., 2024),
- meningkatkan akurasi pelaporan progres hingga 30% dan mengurangi keterlambatan proyek besar hingga 18%

Dengan demikian, IoT dan Digital Twin menjadi tulang punggung dalam menciptakan sistem penjadwalan dinamis yang adaptif terhadap perubahan kondisi lapangan.

D. KESIMPULAN

Integrasi teknologi digital telah membawa perubahan fundamental terhadap metode klasik PERT dan CPM dalam penjadwalan proyek. Transformasi dari metode manual dan statis menuju sistem *data-driven* membuat penjadwalan lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lapangan. Integrasi teknologi berhasil mengatasi kelemahan utama metode konvensional yang

sulit merespons dinamika proyek secara cepat dan akurat. Penggunaan algoritma prediktif memperbaiki estimasi durasi aktivitas dengan memanfaatkan data historis dan variabel *eksternal* seperti cuaca dan produktivitas tenaga kerja. Peningkatan akurasi estimasi durasi mencapai 18–28%, jauh lebih baik dibandingkan pendekatan subjektif pada metode PERT tradisional.

Integrasi CPM dengan BIM 4D memberikan visibilitas yang lebih komprehensif terhadap jalur kritis dan potensi konflik ruang-waktu. Pendekatan ini menurunkan potensi konflik lapangan sebesar 21% dan mengurangi *rework* hingga 14%, terutama karena kemampuannya mendeteksi penyimpangan sebelum konstruksi berjalan. IoT menyediakan data *real-time* dari lapangan, sementara *Digital Twin* memprosesnya menjadi simulasi yang mampu memperbarui jalur kritis secara otomatis. Kombinasi ini menurunkan deviasi jadwal hingga 22% dan meningkatkan akurasi pelaporan progres mencapai 30%.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa masa depan penjadwalan proyek akan berfokus pada pengembangan ekosistem terintegrasi, di mana logika PERT/CPM diperkuat oleh AI, BIM, IoT, dan Digital Twin untuk mencapai efisiensi waktu dan biaya yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abanda, F. H., Musa, A. M., Clermont, P., Tah, J. H. M., & Oti, A. H. (2020). A BIM-based framework for construction project scheduling risk management. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 12(2), 182. <https://doi.org/10.1504/IJCAET.2020.105575>
- Alsakka, F., Yu, H., El-Chami, I., Hamzeh, F., & Al-Hussein, M. (2024). Digital twin for production estimation, scheduling and real-time monitoring in offsite construction. *Computers & Industrial Engineering*, 191, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110173>
- Al-Sinan, M. A., Bubshait, A. A., & Aljaroudi, Z. (2024). Generation of Construction Scheduling through Machine Learning and BIM: A Blueprint. *Buildings*, 14(4), 934. <https://doi.org/10.3390/buildings14040934>
- Awe, M., Malhi, A., Budka, M., Mavengere, N., & Dave, B. (2025). Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM. *Buildings*, 15(7), 1072. <https://doi.org/10.3390/buildings15071072>

- Azevedo, B. F., Rocha, A. M. A. C., & Pereira, A. I. (2024). Hybrid approaches to optimization and machine learning methods: a systematic literature review. *Machine Learning*, 113(7), 4055–4097. <https://doi.org/10.1007/s10994-023-06467-x>
- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Bauskar, S. R., Madhavaram, C. R., Galla, E. P., Sunkara, J. R., Gollangi, H. K., & Rajaram, S. K. (2024). Predictive Analytics for Project Risk Management Using Machine Learning. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 12(04), 566–580. <https://doi.org/10.4236/jdaip.2024.124030>
- Bin Mofidul, R., Alam, Md. M., Rahman, Md. H., & Jang, Y. M. (2022). Real-Time Energy Data Acquisition, Anomaly Detection, and Monitoring System: Implementation of a Secured, Robust, and Integrated Global IIoT Infrastructure with Edge and Cloud AI. *Sensors*, 22(22), 8980. <https://doi.org/10.3390/s22228980>
- Brignardello-Petersen, R., Santesso, N., & Guyatt, G. H. (2025). Systematic reviews of the literature: an introduction to current methods. *American Journal of Epidemiology*, 194(2), 536–542. <https://doi.org/10.1093/aje/kwae232>
- de Oliveira Martins, A., Benetti, V. G., dos Anjos, F. E. V., da Silva, D. O., & Alves, C. J. R. (2025). Systematic Review on the Use of CCPM in Project Management: Empirical Applications and Trends. *Applied Sciences*, 15(15), 8147. <https://doi.org/10.3390/app15158147>
- ForouzeshNejad, A. A., Arabikhan, F., & Ahelerooff, S. (2024). Optimizing Project Time and Cost Prediction Using a Hybrid XGBoost and Simulated Annealing Algorithm. *Machines*, 12(12), 867. <https://doi.org/10.3390/machines12120867>
- Gao, X., & Feng, H. (2023). AI-Driven Productivity Gains: Artificial Intelligence and Firm Productivity. *Sustainability*, 15(11), 8934. <https://doi.org/10.3390/su15118934>
- Guo, K., & Zhang, L. (2022). Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions. *Automation in Construction*, 139, 104256. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104256>

- Hosny, S., Elsaid, E., & Hosny, H. (2023). Prediction of construction material prices using ARIMA and multiple regression models. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(6), 1697–1710. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00597-2>
- Jiang, Z., Shen, X., Ibrahimkhil, M. H., Barati, K., & Linke, J. (2022). SCAN-VS-BIM For Real-Time Progress Monitoring of Bridge Construction Project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W3-2022, 97–104. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-97-2022>
- Kitchenham, B. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*.
https://legacyfileshare.elsevier.com/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf
- Kolaski, K., Logan, L. R., & Ioannidis, J. P. A. (2024). Guidance to best tools and practices for systematic reviews. *British Journal of Pharmacology*, 181(1), 180–210. <https://doi.org/10.1111/bph.16100>
- Koszykowski, M., & Orzeszko, W. (2025). Machine learning in project schedule creation: a systematic literature review. *Journal of Scheduling*. <https://doi.org/10.1007/s10951-025-00857-w>
- Kukkonen, V., Küçükavci, A., Seidenschnur, M., Rasmussen, M. H., Smith, K. M., & Hviid, C. A. (2022). An ontology to support flow system descriptions from design to operation of buildings. *Automation in Construction*, 134, 104067. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104067>
- Lee, J., Kim, S., You, S., & Park, Y.-K. (2023). Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113240>
- Li, W., Zhong, X., Shao, H., Cai, B., & Yang, X. (2022). Multi-mode data augmentation and fault diagnosis of rotating machinery using modified ACGAN designed with new framework. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101552. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101552>
- Li, Y., Li, L., Deng, W., Zhu, D., & Hong, L. (2023). Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Development Knowledge Map: A Review of Visual Analysis Using CiteSpace. *Buildings*, 13(2), 389. <https://doi.org/10.3390/buildings13020389>

- Mahmudnia, D., Arashpour, M., & Yang, R. (2022). Blockchain in construction management: Applications, advantages and limitations. *Automation in Construction*, 140, 104379. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104379>
- Mazher, K. M. (2025). A semi-automated systematic review of literature reviews in construction engineering and management research. *Frontiers in Built Environment*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1582475>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, n160. <https://doi.org/10.1136/bmj.n160>
- Radman, K., Jelodar, M. B., Lovreglio, R., Ghazizadeh, E., & Wilkinson, S. (2025). Real-Time tracking and analysis in construction projects: A RealCONs framework. *Advanced Engineering Informatics*, 67, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103511>
- Reja, V. K., Sindhu Pradeep, M., & Varghese, K. (2024). Digital Twins for Construction Project Management (DT-CPM): Applications and Future Research Directions. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 105(3), 793–807. <https://doi.org/10.1007/s40030-024-00810-8>
- Rucki, M. (2023). Recent Development of Air Gauging in Industry 4.0 Context. *Sensors*, 23(4), 2122. <https://doi.org/10.3390/s23042122>
- Sai Manoj Jayakannan. (2025). Real-time dynamic scheduling in construction: An Artificial Intelligence approach. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 26(2), 2631–2636. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.26.2.1888>
- Sarjono, H., & Kurnia, V. D. (2022). A Systematic Literature Review: Optimization of Implementation of Project Development in the Company with PERT and CPM Method. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2478–2486. <https://doi.org/10.46254/IN02.20220593>
- Shkundalov, D., & Vilutienė, T. (2021). Bibliometric analysis of Building Information Modeling, Geographic Information Systems and Web environment integration. *Automation in Construction*, 128, 103757. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103757>

-
- Silva, J., Ávila, P., Matias, J., Faria, L., Bastos, J., Ferreira, L., & Castro, H. (2024). Bibliographic review of AI applied to project management and its analysis in the context of the metalworking industry. *Procedia CIRP*, 130, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.073>
- Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. *Automation in Construction*, 101, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>
- Villegas-Ch, W., García-Ortiz, J., & Sánchez-Viteri, S. (2024). Toward Intelligent Monitoring in IoT: AI Applications for Real-Time Analysis and Prediction. *IEEE Access*, 12, 40368–40386. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3376707>
- Yaseen, Z. M., Ali, Z. H., Salih, S. Q., & Al-Ansari, N. (2020). Prediction of Risk Delay in Construction Projects Using a Hybrid Artificial Intelligence Model. *Sustainability*, 12(4), 1514. <https://doi.org/10.3390/su12041514>
- Zawacki-Richter, O., Kerres, M., Bedenlier, S., Bond, M., & Buntins Eds, K. (n.d.). *Systematic Reviews in Educational Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-27602-7>
- Zerafat, A., Daniel, E., & Gyoh, L. (2023). *A Systematic Review of the Impacts of Digitalization on Project Management* (pp. 538–544). <https://doi.org/10.36253/979-12-215-0289-3.52>
- Zhang, T., Fu, T., Song, X., & Qu, F. (2022). Multi-objective excavation trajectory optimization for unmanned electric shovels based on pseudospectral method. *Automation in Construction*, 136, 104176. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104176>
- Zhang, X., Zhou, Q., Zhang, H., Zhu, L., & Pei, S. (2025). Integrating Building Information Modeling (BIM) with Ecological Engineering for Sustainable Civil Construction. *E3S Web of Conferences*, 618, 03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561803009>