

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri konstruksi memiliki peran vital dalam pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi suatu negara. Namun, sektor ini menghadapi tantangan signifikan terkait pengendalian waktu dan biaya proyek. Penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar proyek konstruksi mengalami keterlambatan dan pembengkakan biaya yang dapat mencapai 20-30% dari rencana awal (Plaza & Turetken, 2021). Ketidakpastian dalam estimasi durasi dan anggaran proyek konstruksi menjadi permasalahan krusial yang dapat mengakibatkan kerugian finansial, penurunan produktivitas, dan kegagalan pencapaian tujuan proyek.

Manajemen proyek konstruksi memerlukan metode monitoring dan pengendalian yang akurat untuk mengidentifikasi potensi deviasi sejak dini. Earned Value Management (EVM) telah lama dikenal sebagai teknik manajemen proyek yang efektif untuk mengintegrasikan pengukuran kinerja biaya, jadwal, dan ruang lingkup pekerjaan (Pajares & López-Paredes, 2020). EVM menyediakan indikator kinerja seperti Schedule Variance (SV), Cost Variance (CV), Schedule Performance Index (SPI), dan Cost Performance Index (CPI) yang memungkinkan manajer proyek untuk mengevaluasi status proyek secara objektif. Metode ini juga menghasilkan prediksi awal seperti Estimate at Completion (EAC) dan Estimate to Complete (ETC) yang dapat membantu dalam pengambilan keputusan strategis (Acebes et al., 2021).

Meskipun EVM memberikan kerangka kerja yang sistematis, metode tradisional ini memiliki keterbatasan dalam hal akurasi prediksi, terutama pada proyek-proyek kompleks dengan tingkat ketidakpastian tinggi (Khamooshi & Golafshani, 2021). Formulasi klasik EVM cenderung mengasumsikan bahwa pola kinerja proyek akan konsisten hingga akhir, padahal realitas lapangan seringkali jauh lebih dinamis. Penelitian terkini menunjukkan bahwa integrasi EVM dengan teknik machine learning dapat meningkatkan akurasi prediksi waktu dan biaya penyelesaian proyek secara substansial (Zoraghi et al., 2023).

Random Forest, sebagai salah satu algoritma ensemble learning yang powerful, telah menunjukkan performa superior dalam berbagai aplikasi prediksi. Algoritma ini bekerja dengan membangun multiple decision trees dan mengagregasi hasil prediksinya untuk menghasilkan output yang lebih robust dan akurat (Cheng et al., 2020). Keunggulan Random Forest meliputi kemampuan menangani hubungan non-linear antar variabel, resistensi terhadap overfitting, dan mampu mengidentifikasi variabel-variabel penting yang mempengaruhi outcome. Dalam konteks proyek konstruksi, Random Forest dapat mengolah berbagai parameter EVM beserta faktor-faktor eksternal untuk menghasilkan prediksi yang lebih reliable (Lee & Kim, 2023).

Beberapa studi terbaru telah mengeksplorasi penerapan machine learning dalam prediksi kinerja proyek konstruksi. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi data historis EVM dengan algoritma pembelajaran mesin dapat meningkatkan akurasi prediksi hingga 15-25% dibandingkan metode konvensional (Wang & Zhang, 2022). Integrasi ini memungkinkan identifikasi pola-pola kompleks dalam data proyek yang tidak dapat ditangkap oleh formulasi matematis tradisional. Selain itu, pendekatan berbasis data ini dapat beradaptasi dengan karakteristik unik dari setiap proyek, menghasilkan prediksi yang lebih personalized dan kontekstual (Wauters & Vanhoucke, 2020).

Pengembangan model prediktif yang menggabungkan EVM dan Random Forest memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi industri konstruksi. Model ini dapat membantu project manager dalam melakukan early warning system, mengalokasikan sumber daya secara optimal, dan mengambil tindakan korektif yang tepat waktu (Kim & Reinschmidt, 2022). Dengan prediksi yang lebih akurat, stakeholder proyek dapat membuat keputusan yang lebih informed, meminimalkan risiko overrun, dan meningkatkan probabilitas keberhasilan proyek.

Namun demikian, penerapan algoritma machine learning dalam konteks EVM masih memerlukan penelitian lebih lanjut, khususnya terkait dengan pemilihan fitur optimal, hyperparameter tuning, validasi model, dan generalisasi terhadap berbagai jenis proyek konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan framework prediksi yang mengintegrasikan kekuatan analitik EVM dengan kemampuan pembelajaran Random Forest, sehingga menghasilkan sistem prediksi yang akurat, reliable, dan dapat diimplementasikan dalam praktik manajemen proyek konstruksi.

Berdasarkan keseluruhan uraian tersebut, mulai dari tingginya tingkat keterlambatan dan pembengkakan biaya proyek konstruksi, keterbatasan metode Earned Value Management konvensional dalam menghadapi dinamika dan ketidakpastian proyek, hingga potensi pemanfaatan algoritma Random Forest dalam meningkatkan akurasi prediksi kinerja proyek, maka diperlukan suatu penelitian yang komprehensif untuk menjembatani kesenjangan antara pendekatan manajemen proyek tradisional dan teknik analitik berbasis machine learning. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model prediksi biaya dan waktu penyelesaian proyek konstruksi yang mengintegrasikan indikator-indikator EVM dengan algoritma Random Forest, sehingga mampu menangkap pola non-linear dan dinamika kinerja proyek secara lebih akurat dibandingkan metode EVM klasik.

Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing parameter EVM terhadap akurasi prediksi serta menyusun kerangka early warning system berbasis data yang aplikatif bagi manajemen proyek konstruksi. Oleh karena itu, penelitian berjudul "Pengembangan Model Prediksi Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi Menggunakan Integrasi Earned Value Management dan Random Forest" menjadi penting untuk dilakukan guna mengisi kesenjangan penelitian yang

ada sekaligus memberikan kontribusi teoretis dan praktis bagi peningkatan efektivitas pengendalian proyek konstruksi.

1.1.1 Rumusan Masalah

1. Sejauh mana integrasi metode EVM dengan algoritma Random Forest dapat meningkatkan akurasi prediksi biaya dan waktu penyelesaian proyek konstruksi dibandingkan dengan metode EVM konvensional?
2. Bagaimana performa model prediksi berbasis EVM–Random Forest ditinjau dari tingkat akurasi dan error terhadap data proyek konstruksi?

1.1.2 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis peningkatan akurasi prediksi biaya dan waktu penyelesaian proyek konstruksi melalui integrasi metode Earned Value Management (EVM) dengan algoritma Random Forest dibandingkan dengan metode EVM konvensional.
2. Mengevaluasi performa model prediksi berbasis EVM–Random Forest terhadap data proyek konstruksi berdasarkan indikator tingkat akurasi dan nilai error prediksi.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan struktur gabion batu pecah dengan geometri limas segitiga sebagai alternatif pemecah gelombang yang efektif dan ekonomis, serta dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan struktur perlindungan pantai.

1.1.4 Ruang Lingkup

Penelitian ini mencakup analisis dan pemodelan prediksi waktu penyelesaian serta biaya akhir proyek konstruksi menggunakan metode Earned Value Management (EVM) dan algoritma Random Forest. Data yang digunakan berupa data historis proyek konstruksi gedung yang meliputi Planned Value (PV), Earned Value (EV), Actual Cost (AC), Schedule Performance Index (SPI), dan Cost Performance Index (CPI). Penelitian ini difokuskan pada pengembangan model prediksi berbasis pembelajaran mesin dan evaluasi akurasi model menggunakan parameter statistik Mean Absolute Error (MAE) dan koefisien determinasi (R^2). Adapun batasan penelitian meliputi pembatasan variabel input hanya pada indikator EVM, serta tidak dipertimbangkannya faktor eksternal seperti cuaca, perubahan desain, dan kondisi sosial-ekonomi. Selain itu, algoritma pembelajaran mesin yang digunakan dibatasi pada Random Forest dan penelitian ini tidak membahas aspek desain teknis maupun metode pelaksanaan konstruksi secara rinci.

1.2 Teori

1.2.1. Proyek Konstruksi

1.2.1.1. Pengertian Proyek Konstruksi

Proyek konstruksi merupakan suatu kegiatan yang dilaksanakan secara terencana dan bersifat sementara dengan tujuan menghasilkan suatu bangunan atau infrastruktur tertentu melalui pemanfaatan sumber daya yang tersedia. Proyek konstruksi melibatkan proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, serta pengendalian pekerjaan agar tujuan proyek dapat tercapai sesuai sasaran yang ditetapkan.

Hal ini sejalan dengan pendapat Jufri et al. yang menyatakan bahwa proyek konstruksi merupakan kegiatan yang dikelola melalui proses perencanaan, pengaturan, kepemimpinan, dan pengendalian dengan memanfaatkan sumber daya secara optimal untuk mencapai tujuan proyek, khususnya dalam aspek lingkup pekerjaan, waktu, biaya, dan mutu (Jufri et al., 2023).

Selain itu, Napitupulu menegaskan bahwa proyek konstruksi adalah suatu rangkaian pekerjaan yang memiliki batasan waktu pelaksanaan, anggaran biaya, serta spesifikasi teknis yang harus dipenuhi, sehingga membutuhkan sistem manajemen yang terstruktur agar proyek dapat diselesaikan dengan baik (Napitupulu, 2023).

1.2.1.2. Karakteristik Proyek Konstruksi

Proyek konstruksi memiliki karakteristik yang membedakannya dari kegiatan operasional rutin. Salah satu karakteristik utama proyek konstruksi adalah bersifat sementara, memiliki awal dan akhir yang jelas, serta menghasilkan produk fisik berupa bangunan atau infrastruktur.

Menurut Jufri et al., proyek konstruksi melibatkan berbagai sumber daya seperti tenaga kerja, material, peralatan, dan dana yang harus dikelola secara terintegrasi agar tidak terjadi tumpang tindih tugas maupun pemborosan sumber daya (Jufri et al., 2023).

Napitupulu juga menyebutkan bahwa karakteristik proyek konstruksi ditandai dengan tingkat kompleksitas yang tinggi, keterlibatan banyak pihak, serta ketergantungan antar aktivitas pekerjaan, sehingga setiap keterlambatan pada satu pekerjaan dapat berdampak pada pekerjaan lainnya (Napitupulu, 2023).

1.2.1.3. Kendala Utama Proyek Konstruksi

Dalam pelaksanaannya, proyek konstruksi tidak terlepas dari berbagai kendala utama yang dapat mempengaruhi keberhasilan proyek. Kendala tersebut umumnya meliputi waktu, biaya, dan mutu.

a. Kendala Waktu

Waktu merupakan sasaran utama dalam pelaksanaan proyek konstruksi. Jufri et al. menyatakan bahwa keberhasilan proyek sangat ditentukan oleh kemampuan manajemen proyek dalam mengendalikan jadwal pelaksanaan agar sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan (Jufri et al., 2023).

b. Kendala Biaya

Biaya proyek konstruksi harus dikelola secara efektif untuk menghindari terjadinya pembengkakan anggaran. Monitoring biaya secara berkala diperlukan untuk menyesuaikan antara rencana anggaran dan realisasi biaya di lapangan (Jufri et al., 2023).

c. Kendala Mutu

Mutu proyek konstruksi berkaitan dengan kesesuaian hasil pekerjaan terhadap spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Napitupulu menjelaskan bahwa mutu menjadi indikator keberhasilan proyek karena mutu yang tidak terpenuhi dapat menyebabkan pekerjaan ulang, keterlambatan, serta peningkatan biaya proyek (Napitupulu, 2023).

1.2.1.4. Ketidakpastian dan Risiko dalam Proyek Konstruksi

Proyek konstruksi memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi akibat pengaruh faktor internal maupun eksternal. Ketidakpastian tersebut dapat berupa perubahan desain, kondisi lapangan yang tidak terduga, keterlambatan material, hingga faktor cuaca.

Menurut Napitupulu, risiko dalam proyek konstruksi merupakan potensi kejadian yang dapat menghambat pencapaian tujuan proyek baik dari segi waktu, biaya, maupun mutu, sehingga perlu dilakukan identifikasi dan pengendalian risiko sejak tahap perencanaan (Napitupulu, 2023).

Sementara itu, Jufri et al. menyatakan bahwa pengendalian risiko proyek konstruksi dapat dilakukan melalui sistem manajemen yang baik, terutama dengan melakukan monitoring dan evaluasi secara berkala terhadap pelaksanaan pekerjaan untuk meminimalkan dampak ketidakpastian (Jufri et al., 2023).

1.2.2. Manajemen Proyek Konstruksi

1.2.2.1. Pengertian Manajemen Proyek

Manajemen proyek konstruksi merupakan suatu proses yang terdiri dari perencanaan, pengaturan, kepemimpinan, dan pengendalian terhadap seluruh kegiatan proyek dengan memanfaatkan sumber daya secara optimal untuk mencapai sasaran yang telah ditetapkan. Definisi ini menegaskan bahwa keberhasilan proyek sangat bergantung pada kemampuan manajemen dalam mengoordinasikan seluruh elemen proyek secara terpadu.

Jufri et al. menyatakan bahwa manajemen konstruksi adalah proses dari perencanaan, pengaturan, kepemimpinan, dan pengendalian dari suatu proyek oleh para anggotanya dengan memanfaatkan sumber daya seoptimal mungkin untuk mencapai sasaran yang telah ditentukan (Jufri et al., 2023).

1.2.2.2. Fungsi Manajemen Proyek Konstruksi

Fungsi manajemen proyek konstruksi mencakup beberapa aktivitas utama yang saling berkaitan, yaitu perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian. Ketiga

fungsi tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa proyek berjalan sesuai dengan rencana serta memenuhi target waktu, biaya, dan mutu.

Gunawan et al. menjelaskan bahwa fungsi dasar manajemen proyek meliputi perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian, di mana pengendalian dilakukan terhadap sumber daya seperti tenaga kerja, peralatan, bahan, uang, dan metode kerja (Gunawan et al., 2024).

1.2.2.3. Manajemen Waktu Proyek

Manajemen waktu proyek merupakan bagian penting dalam manajemen proyek konstruksi yang bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh aktivitas proyek dapat diselesaikan sesuai jadwal yang telah direncanakan. Pengelolaan waktu yang baik dapat meminimalkan risiko keterlambatan dan meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek.

Jufri et al. menyatakan bahwa waktu dan jadwal merupakan sasaran utama dalam pelaksanaan proyek konstruksi, sehingga diperlukan pengendalian jadwal secara berkala untuk menjaga kesesuaian antara rencana dan realisasi pekerjaan (Jufri et al., 2023).

Selain itu, Gunawan et al. menjelaskan bahwa metode penjadwalan seperti Bar Chart, S-Curve, dan Critical Path Method (CPM) digunakan untuk membantu pengendalian waktu proyek agar tidak terjadi keterlambatan pelaksanaan pekerjaan (Gunawan et al., 2024).

1.2.2.4. Manajemen Biaya Proyek

Manajemen biaya proyek berkaitan dengan perencanaan, penganggaran, serta pengendalian biaya agar pengeluaran proyek tidak melebihi anggaran yang telah ditetapkan. Pengendalian biaya dilakukan secara berkelanjutan melalui monitoring realisasi biaya terhadap rencana anggaran biaya (RAB).

Jufri et al. menjelaskan bahwa monitoring secara berkala diperlukan untuk mengendalikan perkembangan perubahan agar dapat meminimalkan terjadinya pembengkakan biaya proyek (Jufri et al., 2023).

Sementara itu, Gunawan et al. menyebutkan bahwa perhitungan RAB dan evaluasi biaya merupakan bagian penting dari manajemen konstruksi untuk mengetahui efektivitas implementasi manajemen proyek (Gunawan et al., 2024).

1.2.2.5. Pengendalian Kinerja Proyek

Pengendalian kinerja proyek merupakan upaya untuk memastikan bahwa pelaksanaan proyek berjalan sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan. Pengendalian dilakukan melalui pemantauan kinerja waktu, biaya, dan mutu, serta pengambilan tindakan korektif apabila terjadi penyimpangan.

Jufri et al. menyatakan bahwa pengendalian proyek dilakukan melalui monitoring perkembangan pekerjaan, pengendalian biaya, serta pengawasan terhadap mutu pekerjaan untuk menjamin tercapainya sasaran proyek (Jufri et al., 2023).

Selain itu, Tinambunan menjelaskan bahwa pengendalian kinerja proyek juga berkaitan erat dengan manajemen risiko, yang meliputi pemantauan risiko, evaluasi kinerja, dan penerapan tindakan korektif selama siklus proyek berlangsung (Tinambunan, 2024).

1.2.3. Earned Value Management (EVM)

Earned Value Management (EVM) merupakan metode pengendalian proyek yang mengintegrasikan ruang lingkup pekerjaan, biaya, dan waktu untuk menilai kinerja proyek secara objektif dan kuantitatif. Metode ini memungkinkan manajer proyek untuk membandingkan antara rencana awal dengan realisasi pelaksanaan sehingga penyimpangan dapat diidentifikasi sejak dini dan dilakukan tindakan korektif yang tepat (Fairuz et al., 2025).

1.2.3.1. Pengertian Earned Value Management

EVM didefinisikan sebagai teknik manajemen proyek yang digunakan untuk mengevaluasi kemajuan dan kinerja proyek dengan mengacu pada tiga parameter utama, yaitu biaya, jadwal, dan ruang lingkup pekerjaan. Metode ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi proyek saat ini sekaligus memproyeksikan kinerja proyek di masa mendatang (Fairuz et al., 2025).

Selain itu, EVM telah berkembang menjadi metodologi yang diakui secara global karena kemampuannya dalam menyediakan pengukuran kinerja proyek yang objektif dan terintegrasi, serta digunakan secara luas pada berbagai sektor industri (Battula et al., 2025).

1.2.3.2. Konsep Dasar EVM

Konsep dasar Earned Value Management berlandaskan pada tiga parameter utama sebagai berikut (Battula et al., 2025):

- a. **Planned Value (PV)**
Planned Value merupakan nilai anggaran yang direncanakan untuk pekerjaan yang dijadwalkan hingga periode tertentu. PV mencerminkan biaya yang seharusnya dikeluarkan sesuai dengan rencana proyek.
- b. **Earned Value (EV)**
Earned Value adalah nilai anggaran dari pekerjaan yang telah diselesaikan secara aktual pada periode tertentu. EV menggambarkan sejauh mana pekerjaan proyek telah dicapai dibandingkan dengan rencana awal.
- c. **Actual Cost (AC)**
Actual Cost merupakan biaya aktual yang telah dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerjaan yang telah dilakukan. Parameter ini digunakan untuk mengetahui realisasi pengeluaran proyek.

1.2.3.3. Indikator Kinerja EVM

Indikator kinerja EVM digunakan untuk mengevaluasi efisiensi biaya dan jadwal proyek, meliputi (Fairuz et al., 2025) :

a. Schedule Variance (SV)

Schedule Variance digunakan untuk mengukur perbedaan antara nilai pekerjaan yang telah diselesaikan dan nilai pekerjaan yang direncanakan.

SV dihitung dengan rumus:

$$SV = EV - PV$$

Nilai SV positif menunjukkan proyek lebih cepat dari jadwal, sedangkan SV negatif menunjukkan keterlambatan proyek

b. Cost Variance (CV)

Cost Variance menunjukkan selisih antara nilai pekerjaan yang telah diselesaikan dengan biaya aktual yang dikeluarkan.

Rumus CV:

$$CV = EV - AC$$

CV positif menandakan efisiensi biaya, sedangkan CV negatif menunjukkan pemborosan biaya

c. Schedule Performance Index (SPI)

SPI digunakan untuk mengukur efisiensi kinerja proyek terhadap jadwal.

Rumus SPI:

$$SPI = EV / PV$$

Nilai SPI lebih besar dari 1 menunjukkan proyek berjalan lebih cepat dari rencana, sedangkan nilai kurang dari 1 menunjukkan keterlambatan

d. Cost Performance Index (CPI)

CPI digunakan untuk mengukur efisiensi penggunaan biaya proyek.

Rumus CPI:

$$CPI = EV / AC$$

Nilai CPI lebih besar dari 1 menunjukkan proyek berjalan efisien dari segi biaya

1.2.3.4. Estimasi Waktu dan Biaya Proyek dengan EVM

EVM tidak hanya digunakan untuk evaluasi kinerja, tetapi juga untuk memperkirakan biaya dan waktu penyelesaian proyek (Fairuz et al., 2025).

a. Estimate at Completion (EAC)

EAC merupakan estimasi total biaya proyek hingga selesai berdasarkan kinerja proyek saat ini.

Rumus:

$$EAC=AC+ETC$$

EAC memberikan gambaran total biaya yang diperkirakan pada akhir proyek

b. Estimate to Complete (ETC)

ETC merupakan perkiraan biaya yang masih dibutuhkan untuk menyelesaikan sisa pekerjaan proyek dengan asumsi kinerja proyek tetap sama.

Rumus:

$$ETC= CPI (BAC-EV)$$

c. Estimate at Schedule (EAS)

EAS adalah perkiraan durasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek dengan menjumlahkan waktu pekerjaan yang sudah dilakukan ditambah dengan hasil dari ETS

Rumus:

$$EAS = \text{Waktu selesai} + ETS$$

d. Estimate at Completion (ETS)

ETS adalah estimasi waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan sisa pekerjaan lapangan

Rumus:

$$ETS = (\text{Sisa waktu})/SPI$$

1.2.3.5. Kelebihan dan Keterbatasan Metode EVM

- Kelebihan EVM

EVM memiliki kelebihan utama berupa kemampuan dalam mengintegrasikan aspek biaya, jadwal, dan ruang lingkup pekerjaan sehingga memberikan informasi kinerja proyek yang objektif dan kuantitatif. Selain itu, EVM mampu memberikan peringatan dini terhadap potensi keterlambatan dan pembengkakan biaya proyek (Battula et al., 2025).

- Keterbatasan EVM

Meskipun memiliki banyak keunggulan, EVM juga memiliki keterbatasan, antara lain subjektivitas dalam pengukuran progres pekerjaan, keterbatasan dalam mengakomodasi ketidakpastian dan risiko proyek, serta ketergantungan pada kualitas data yang akurat dan tepat waktu (Battula et al., 2025).

1.2.4. Prediksi Waktu dan Biaya Proyek Konstruksi

Prediksi waktu dan biaya merupakan aspek krusial dalam manajemen proyek konstruksi karena berpengaruh langsung terhadap pengambilan keputusan, pengendalian risiko, serta keberhasilan proyek secara keseluruhan. Ketidakakuratan prediksi sering menyebabkan keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya (ForouseshNejad et al., 2024).

1.2.4.1. Konsep Prediksi dalam Proyek Konstruksi

Prediksi waktu dan biaya proyek konstruksi adalah proses memperkirakan durasi penyelesaian proyek dan total biaya yang dibutuhkan berdasarkan data historis, karakteristik aktivitas proyek, serta tingkat ketidakpastian yang ada. Prediksi yang akurat memungkinkan manajer proyek mengalokasikan sumber daya secara optimal dan mengurangi risiko keterlambatan.

ForouzesNejad et al. menyatakan bahwa prediksi waktu dan biaya proyek berperan penting dalam meningkatkan kualitas perencanaan dan pengambilan keputusan, terutama pada proyek konstruksi yang memiliki kompleksitas jaringan aktivitas dan ketidakpastian tinggi. Mereka menegaskan bahwa akurasi prediksi sangat dipengaruhi oleh kompleksitas hubungan antar aktivitas dan faktor lingkungan proyek (ForouseshNejad et al., 2024).

Selain itu, AITalhani et al. menjelaskan bahwa prediksi biaya konstruksi sangat dipengaruhi oleh faktor ekonomi makro seperti inflasi, GDP, dan fluktuasi harga material, sehingga pendekatan prediksi harus mempertimbangkan indikator-indikator tersebut secara sistematis (AITalhani et al., 2024)..

1.2.4.2. Metode Konvensional Prediksi Waktu dan Biaya

Metode konvensional prediksi waktu dan biaya proyek konstruksi umumnya menggunakan pendekatan statistik dan time series. Metode yang sering digunakan meliputi regresi linear, ARIMA, SARIMA, dan Program Evaluation and Review Technique (PERT).

Menurut AITalhani et al., metode time series seperti ARIMA dan SARIMA masih banyak digunakan untuk memprediksi indeks biaya konstruksi karena relatif sederhana dan mudah diimplementasikan, terutama untuk prediksi jangka pendek. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam menangkap perubahan pasar yang bersifat dinamis dan lonjakan data secara tiba-tiba (AITalhani et al., 2024).

ForouzesNejad et al. juga menyebutkan bahwa metode tradisional seperti Earned Value Management (EVM) dan Earned Schedule Method (ESM) bersifat statis dan kurang mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan kompleksitas dan ketidakpastian proyek secara real-time (ForouseshNejad et al., 2024).

1.2.4.3. Tantangan Prediksi Waktu dan Biaya Proyek

Tantangan utama dalam prediksi waktu dan biaya proyek konstruksi meliputi ketidakpastian, kompleksitas jaringan aktivitas, volatilitas pasar, serta keterbatasan data historis. Faktor-faktor ini sering menyebabkan deviasi antara estimasi dan realisasi proyek.

ForouzeshehNejad et al. menegaskan bahwa ketidakpastian lingkungan, seperti perubahan desain, kondisi cuaca, fluktuasi harga material, dan risiko ekonomi, merupakan penyebab utama ketidakakuratan prediksi waktu dan biaya proyek konstruksi (ForouzeshehNejad et al., 2024).

Sementara itu, AlTalhoni et al. mengidentifikasi bahwa tantangan besar dalam prediksi biaya adalah sulitnya memodelkan pengaruh indikator ekonomi makro dan gangguan rantai pasok terhadap indeks biaya konstruksi, terutama dalam jangka panjang (AlTalhoni et al., 2024).

1.2.5. Machine Learning dalam Proyek Konstruksi

Machine Learning (ML) merupakan bagian dari Artificial Intelligence (AI) yang semakin banyak digunakan di industri konstruksi untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan berbasis data. Dalam konteks proyek konstruksi, ML umumnya dimanfaatkan untuk memprediksi kinerja proyek (biaya, waktu, dan risiko), meningkatkan efisiensi proses manajemen, serta mendukung otomasi dan optimisasi pekerjaan yang sebelumnya banyak bergantung pada pengalaman subjektif. Penerapan ML juga berkembang seiring meningkatnya ketersediaan data proyek dari BIM, sensor, laporan lapangan, serta sistem informasi proyek. (Adebayo et al., 2025; Elmousalami et al., 2025)

1.2.5.1. Pengertian Machine Learning

Machine Learning adalah pendekatan komputasional yang memungkinkan sistem mempelajari pola dari data sehingga mampu melakukan tugas tertentu—misalnya klasifikasi, prediksi, atau rekomendasi—tanpa diprogram secara eksplisit untuk setiap aturan. Dalam konstruksi, definisi ini relevan karena banyak masalah proyek bersifat kompleks dan dinamis, sehingga pendekatan berbasis pembelajaran data menjadi alternatif yang efektif untuk analisis kinerja, estimasi, dan mitigasi risiko. (Adebayo et al., 2025; Elmousalami et al., 2025)

1.2.5.2. Jenis-Jenis Machine Learning

a. Supervised Learning

Supervised learning adalah jenis ML yang bekerja menggunakan data berlabel, yaitu data historis yang memiliki target/hasil (misalnya: “proyek terlambat atau tidak”, “biaya membengkak atau tidak”, “terjadi insiden keselamatan atau tidak”). Model dilatih untuk memetakan input ke output, lalu digunakan untuk memprediksi hasil pada data baru. Dalam proyek konstruksi, supervised learning banyak digunakan untuk prediksi keterlambatan, estimasi biaya, penilaian risiko, dan pemodelan keselamatan kerja. (Adebayo et al., 2025; Badhan & Samsami, 2025)

b. Unsupervised Learning

Unsupervised learning menggunakan data tanpa label dan bertujuan menemukan struktur/pola tersembunyi, seperti pengelompokan (clustering) atau deteksi anomali. Dalam konstruksi, pendekatan ini

berguna ketika data proyek tidak memiliki “jawaban benar” yang jelas, misalnya untuk mengelompokkan pola risiko, mengidentifikasi perilaku kerja yang tidak wajar, atau mendeteksi anomali pada data sensor/peralatan dan catatan lapangan. (Adebayo et al., 2025; Elmousalami et al., 2025)

1.2.5.3. Penerapan Machine Learning pada Manajemen Proyek Konstruksi

Penerapan ML pada manajemen proyek konstruksi dapat dijelaskan melalui beberapa area utama berikut:

- a. **Prediksi kinerja proyek (waktu dan biaya)**
ML digunakan untuk memprediksi potensi keterlambatan dan pembengkakan biaya berdasarkan data historis proyek dan variabel-variabel yang memengaruhi (misalnya produktivitas, perubahan desain, kondisi lapangan, dan pola pengadaan). Prediksi ini membantu manajer proyek melakukan tindakan korektif lebih dini. (Adebayo et al., 2025; Elmousalami et al., 2025)
- b. **Manajemen risiko proyek**
Model ML dapat membantu mengidentifikasi faktor risiko dominan dan memperkirakan probabilitas kejadian risiko. Hasilnya dapat dipakai untuk prioritisasi mitigasi dan perencanaan kontinjensi yang lebih terukur. (Adebayo et al., 2025; Elmousalami et al., 2025)
- c. **Keselamatan kerja (construction safety management)**
Dalam keselamatan konstruksi, ML digunakan untuk memprediksi potensi insiden, mengklasifikasikan tingkat risiko, serta mendukung sistem peringatan dini (early warning). Kajian terbaru juga menekankan pentingnya aspek “responsible AI” seperti transparansi, keandalan, dan evaluasi model saat diadopsi untuk keputusan keselamatan. (Badhan & Samsami, 2025)
- d. **Otomasi dan optimisasi proses manajemen konstruksi**
ML dapat memperkuat otomasi pada proses monitoring, pelaporan, dan optimisasi keputusan operasional (misalnya alokasi sumber daya, penjadwalan, dan pengambilan keputusan berbasis indikator). Penerapan ini sering terhubung dengan sistem digital (BIM, platform manajemen proyek, dan pipeline data) untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. (Elmousalami et al., 2025)

1.2.6. Algoritma Random Forest

1.2.6.1. Pengertian Algoritma Random Forest

Random Forest (RF) adalah algoritma ensemble learning yang membangun banyak decision tree dan menggabungkan hasilnya untuk menghasilkan prediksi yang lebih stabil dan akurat. RF dapat digunakan untuk dua tipe masalah utama, yaitu klasifikasi dan regresi. Dalam konteks konstruksi, RF banyak dipakai untuk memprediksi variabel penting proyek karena mampu

memanfaatkan data historis untuk menghasilkan estimasi yang lebih andal. (Alazawy et al., 2025; Bayrak & Aydın, 2025)

1.2.6.2. Konsep Dasar Decision Tree

Decision Tree adalah model prediktif yang membagi data ke dalam beberapa cabang berdasarkan aturan pemisahan (split) pada variabel tertentu sehingga membentuk struktur pohon dari node akar hingga node daun. Pemisahan pada setiap node bertujuan mencari pembagian terbaik agar data dalam tiap cabang menjadi lebih “homogen” sesuai target yang diprediksi. Pada RF, decision tree menjadi model dasar yang dibangun berulang kali dalam jumlah banyak untuk menghasilkan prediksi kolektif. (Alazawy et al., 2025)

1.2.6.3. Mekanisme Kerja Random Forest

Mekanisme kerja RF pada umumnya mengikuti tahapan berikut: (Alazawy et al., 2025)

- a. Bootstrap sampling (bagging): RF mengambil sampel acak dari data latih dengan pengembalian (sampling with replacement) untuk membangun setiap pohon.
- b. Random feature selection: pada setiap node, RF memilih subset fitur secara acak untuk menentukan pemisahan terbaik, sehingga antar-pohon menjadi lebih beragam.
- c. Membangun banyak pohon: proses ini diulang hingga jumlah pohon yang ditentukan tercapai.
- d. Agregasi prediksi: untuk regresi, hasil prediksi digabungkan dengan rata-rata; untuk klasifikasi, digabungkan dengan voting mayoritas.
- e. Evaluasi internal: RF dapat memanfaatkan konsep out-of-bag untuk memperkirakan kesalahan model tanpa perlu memisahkan data uji secara eksplisit pada beberapa kasus.

1.2.6.4. Kelebihan dan Keterbatasan Random Forest

- a. Kelebihan Random Forest (Bayrak & Aydın, 2025)
 - Lebih robust dan stabil: penggabungan banyak pohon (bagging) membantu mengurangi variansi, sehingga prediksi cenderung lebih stabil.
 - Relatif tahan terhadap data noisy atau tidak lengkap: RF tetap dapat memberikan prediksi yang cukup kuat meskipun ada ketidaksempurnaan data.
 - Mengurangi risiko overfitting dibanding single tree: karena hasil merupakan agregasi banyak pohon, model cenderung tidak “terlalu menyesuaikan” data latih.
 - Dapat memberikan informasi pentingnya fitur: RF dapat digunakan untuk melihat variabel mana yang paling berpengaruh terhadap prediksi.

- b. Keterbatasan Random Forest (Alazawy et al., 2025)
 - Interpretabilitas lebih rendah (black box): dibanding decision tree tunggal, RF lebih sulit dijelaskan karena terdiri dari banyak pohon.
 - Perlu pendekatan explainability tambahan: untuk memperjelas kontribusi setiap fitur terhadap prediksi, penelitian dapat menggunakan metode seperti SHAP.

1.2.6.5. Random Forest untuk Prediksi Data Waktu dan Biaya

- a. Prediksi Biaya (Cost)

RF dapat digunakan untuk prediksi/estimasi biaya konstruksi, misalnya pada studi prediksi biaya konstruksi pembangkit listrik. Dalam penelitian tersebut, RF digunakan sebagai model utama untuk memperkirakan biaya berdasarkan variabel-variabel proyek, dan kemudian dijelaskan menggunakan metode explainable AI (SHAP) agar pengaruh setiap fitur terhadap biaya dapat dipahami. (Alazawy et al., 2025)
- b. Prediksi Waktu (Time) melalui indikator produktivitas dan kinerja pelaksanaan

Prediksi waktu proyek dapat didekati melalui variabel yang berkaitan langsung dengan durasi pekerjaan, misalnya produktivitas tenaga kerja. Studi pada proses konstruksi menunjukkan bahwa model AI (termasuk RF) dapat dipakai untuk memprediksi produktivitas, yang pada akhirnya membantu manajer proyek mengantisipasi deviasi jadwal serta mengurangi risiko keterlambatan dan penyimpangan biaya. Dengan demikian, RF relevan untuk prediksi aspek waktu karena produktivitas merupakan salah satu faktor penentu utama durasi aktivitas konstruksi. (Bayrak & Aydın, 2025)

1.2.7. Integrasi Metode EVM dan Algoritma Random Forest

1.2.7.1. Konsep Integrasi EVM dan Machine Learning

Integrasi Earned Value Management/Analysis (EVM/EVA) dengan machine learning (ML) muncul karena metode EVM tradisional umumnya memakai model peramalan berbasis indeks (index-based forecasting) untuk memprediksi Estimate at Completion (EAC), sementara kondisi proyek sering bersifat dinamis dan kompleks. Dalam pendekatan terkini, prediksi EAC dapat dilakukan dengan menggabungkan metrik EVM dengan teknik ML berbasis regresi untuk menangkap pola nonlinier dari data historis proyek. Pendekatan ini memungkinkan model menganalisis variabel proyek secara simultan tanpa memerlukan formulasi model manual yang kaku, sehingga prediksi dapat menjadi lebih akurat dan tepat waktu dibandingkan EVM/ESM murni. (Ottaviani et al., 2025)

Selain itu, integrasi ML juga dipandang sebagai cara untuk membantu manajer proyek meningkatkan kemampuan estimasi EAC dengan memanfaatkan variabel-variabel EVM sebagai input model prediktif. (Yalçın et al., 2024)

1.2.7.2. Parameter EVM sebagai Variabel Input Random Forest

Pada integrasi EVM–Random Forest, variabel input umumnya berasal dari dua kelompok: data monitoring proyek dan baseline. Data monitoring mencakup variabel seperti Earned Value (EV), Actual Cost (AC), serta komponen waktu aktual, sedangkan baseline mencakup Planned Value (PV), durasi rencana, dan Budget at Completion (BAC). Dari variabel dasar ini, dapat diturunkan indikator kontrol kinerja seperti Cost Performance Index (CPI), Schedule Performance Index (SPI), serta variance seperti Cost Variance (CV) dan Schedule Variance (SV). (Ottaviani et al., 2025; Yalçın et al., 2024)

Selain metrik EVM klasik, beberapa studi juga memasukkan metrik berbasis Earned Schedule (ESM) seperti Earned Schedule (ES), time variance, dan indeks jadwal berbasis waktu untuk memperkaya informasi prediksi durasi dan biaya secara bersamaan. Variabel-variabel EVM/ESM ini dapat disusun sebagai fitur input untuk model ensemble seperti Random Forest. (Ottaviani et al., 2025)

1.2.7.3. Peran Random Forest dalam Meningkatkan Akurasi Prediksi EVM

Random Forest (RF) berperan sebagai model ensemble yang memanfaatkan banyak decision tree untuk mempelajari pola hubungan antara variabel EVM/ESM dan target prediksi seperti EAC biaya maupun durasi. Dengan memanfaatkan pembelajaran data historis, RF dapat mengurangi keterbatasan model EVM berbasis indeks yang cenderung tidak fleksibel ketika menghadapi pola proyek yang nonlinier atau berubah. Dalam studi yang membangun pipeline ML untuk peramalan biaya dan durasi berbasis EVM, model-model ML (termasuk pendekatan ensemble) dilaporkan mampu mencapai akurasi, presisi, dan ketepatan waktu yang lebih baik dibanding model EVM/ESM tradisional. (Ottaviani et al., 2025)

Dari perspektif integrasi variabel EVM dengan ML, penggunaan model ML juga ditujukan untuk membantu manajer proyek memperoleh estimasi EAC yang lebih baik melalui pemanfaatan variabel EVM sebagai fitur input. (Yalçın et al., 2024)

1.2.7.4. Perbandingan Prediksi Menggunakan EVM dan EVM–Random Forest

Perbedaan utama antara EVM tradisional dan EVM–Random Forest terletak pada cara melakukan peramalan:

EVM tradisional melakukan perhitungan prediksi EAC menggunakan rumus berbasis indeks yang diturunkan dari PV, EV, AC, BAC, dan indikator turunan seperti CPI dan SPI. Model ini bersifat relatif sederhana dan cepat, namun dapat kurang adaptif terhadap kompleksitas proyek. (Ottaviani et al., 2025; Yalçın et al., 2024)

EVM–Random Forest menggunakan variabel-variabel EVM (dan/atau ESM) sebagai input, lalu mempelajari hubungan data untuk menghasilkan prediksi EAC secara data-driven. Dengan pendekatan ini, prediksi dapat dibandingkan

menggunakan metrik evaluasi (misalnya MAE/RMSE), dan dalam beberapa skenario, pendekatan ML menunjukkan performa yang lebih unggul dibanding baseline EVM/ESM, meskipun hasil bisa bergantung pada progres proyek, kualitas data, dan konfigurasi model. (Ottaviani et al., 2025)

Selain itu, penelitian yang mengevaluasi ML terhadap metode EVM-based juga menunjukkan bahwa integrasi ML ke variabel EVM dapat meningkatkan kualitas estimasi EAC, sehingga layak dijadikan pembanding terhadap peramalan EVM konvensional. (Yalçın et al., 2024)

1.2.8. Penelitian Terdahulu

1.2.8.1. Penelitian Terkait Earned Value Management

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa Earned Value Management/Analysis (EVM/EVA) banyak digunakan sebagai metode pengendalian proyek untuk memantau kinerja biaya dan jadwal serta melakukan peramalan, misalnya melalui Estimate at Completion (EAC). Namun, pendekatan peramalan tradisional berbasis indeks EVM/ESM memiliki keterbatasan karena sering sulit menangkap dinamika proyek dan pengaruh variabel eksternal yang kompleks. Studi terbaru juga menekankan tantangan umum dalam pemodelan prediktif EVM, yaitu risiko underfitting (model terlalu sederhana sehingga tidak menangkap pola penting) dan overfitting (model terlalu menyesuaikan data latih sehingga buruk pada data baru). (Ottaviani et al., 2025)

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, sejumlah penelitian mulai mengintegrasikan machine learning (ML) ke dalam konteks EVM/EVA. ML dinilai mampu menganalisis variabel biaya, durasi, dan indikator proyek lainnya secara bersamaan serta mengenali pola dari data historis tanpa harus menetapkan rumus prediksi yang kaku. Oleh karena itu, integrasi ML dipandang dapat meningkatkan akurasi, presisi, dan ketepatan waktu prediksi dibanding metode EVM/ESM konvensional, terutama ketika pembangunan model dilakukan dengan pipeline yang robust untuk mengurangi bias dan mencegah kebocoran data antar proyek. (Ottaviani et al., 2025)

1.2.8.2. Penelitian Terkait Random Forest dalam Proyek Konstruksi

Penelitian terkait Random Forest (RF) dalam proyek konstruksi banyak menyoroti kemampuan RF sebagai metode ensemble untuk prediksi variabel penting proyek, terutama biaya konstruksi. Studi terbaru pada kasus prediksi biaya konstruksi pembangkit listrik menunjukkan bahwa RF dapat memberikan performa prediksi yang kuat dan dapat dibandingkan dengan model lain seperti SVR dan KNN menggunakan metrik evaluasi (misalnya R^2 , MAE, RMSE). Hasil penelitian tersebut menempatkan RF sebagai model dengan kinerja terbaik di antara metode pembanding yang diuji. (Alazawy et al., 2025)

Selain akurasi, penelitian RF modern juga menekankan kebutuhan interpretabilitas (explainability) karena model ML sering dianggap sebagai black box. Untuk itu, penelitian di bidang konstruksi mulai menggabungkan RF dengan metode

interpretasi seperti SHAP agar kontribusi tiap variabel terhadap hasil prediksi dapat dipahami oleh pengambil keputusan. (Alazawy et al., 2025)

1.2.8.3. Posisi dan Kebaruan Penelitian

Berdasarkan penelitian terdahulu, terlihat dua arah besar perkembangan: (1) penguatan EVM/EVA melalui pendekatan data-driven untuk mengatasi keterbatasan peramalan berbasis indeks, dan (2) pemanfaatan model ensemble seperti Random Forest untuk meningkatkan akurasi prediksi variabel proyek serta menyediakan analisis faktor dominan melalui teknik explainable AI. (Ottaviani et al., 2025; Alazawy et al., 2025)

Dengan demikian, posisi penelitian Anda dapat ditempatkan pada irisan kedua arah tersebut, yaitu mengembangkan atau mengevaluasi pendekatan EVM–Random Forest untuk meningkatkan kualitas prediksi kinerja proyek (misalnya EAC biaya dan/atau durasi). Sementara kebaruan penelitian dapat ditegaskan pada: penggunaan parameter EVM sebagai fitur input model prediktif yang robust, pengujian peningkatan akurasi dibanding EVM tradisional, serta (jika digunakan) penyediaan interpretasi model untuk menjelaskan faktor yang paling memengaruhi hasil prediksi sebagai dukungan keputusan manajemen proyek. (Ottaviani et al., 2025; Alazawy et al., 2025)

1.2.9. Kerangka Pemikiran Penelitian

Kerangka pemikiran penelitian ini menjelaskan hubungan logis antara data proyek, indikator Earned Value Management (EVM), algoritma Random Forest, dan prediksi waktu serta biaya proyek. Alur berpikirnya adalah: data proyek dikonversi menjadi indikator EVM sebagai representasi kinerja, kemudian indikator tersebut digunakan sebagai variabel input model Random Forest untuk menghasilkan prediksi biaya dan durasi akhir proyek secara lebih akurat dan adaptif. (Ottaviani et al., 2025; Alazawy et al., 2025)

1.2.9.1. Data Proyek

Penelitian dimulai dari pengumpulan data proyek yang berasal dari baseline perencanaan dan data monitoring pelaksanaan. Data ini mencakup komponen biaya dan jadwal seperti Planned Value (PV), Earned Value (EV), Actual Cost (AC), durasi rencana dan durasi aktual, serta informasi anggaran proyek seperti Budget at Completion (BAC). Data historis dari proyek yang sudah berjalan/selesai menjadi dasar pembelajaran pola hubungan antara kinerja proyek dan hasil akhir (biaya dan waktu). (Ottaviani et al., 2025)

1.2.9.2. Indikator EVM

Dari data proyek tersebut, dihitung indikator EVM yang berfungsi sebagai ringkasan kinerja biaya dan jadwal. Indikator yang umum digunakan mencakup Cost Performance Index (CPI), Schedule Performance Index (SPI), serta varians biaya dan jadwal seperti Cost Variance (CV) dan Schedule Variance (SV). Indikator-indikator ini penting karena menggambarkan deviasi proyek terhadap rencana dan

dapat digunakan sebagai variabel prediktor untuk memperkirakan kondisi akhir proyek. (Ottaviani et al., 2025)

1.2.9.3. Algoritma Random Forest

Selanjutnya, indikator EVM dipakai sebagai variabel input untuk algoritma Random Forest. Random Forest merupakan metode ensemble yang membangun banyak decision tree dari sampel data acak (bootstrap) dan menggabungkan hasil prediksi tiap pohon. Karakter ini membuat Random Forest relatif stabil, mampu menangkap hubungan nonlinier, dan cenderung lebih tahan terhadap variasi/noise data dibanding model pohon tunggal. (Alazawy et al., 2025)

1.2.9.4. Prediksi Waktu dan Biaya Proyek

Keluaran model Random Forest berupa prediksi biaya akhir proyek dan/atau prediksi durasi akhir proyek, misalnya dalam bentuk estimasi Estimate at Completion (EAC) untuk biaya dan estimasi durasi penyelesaian proyek. Prediksi ini dibentuk dengan memetakan pola historis antara indikator Earned Value Management (EVM) selama pelaksanaan proyek terhadap hasil akhir proyek. Dalam metode EVM, kinerja biaya dan kinerja waktu saling berkaitan karena keduanya dihitung dari variabel dasar yang sama, yaitu Planned Value (PV), Earned Value (EV), Actual Cost (AC), Budget at Completion (BAC), serta durasi rencana dan durasi aktual. Dari variabel tersebut kemudian diperoleh indikator kinerja proyek seperti Cost Performance Index (CPI) yang menggambarkan kinerja biaya serta Schedule Performance Index (SPI) yang menggambarkan kinerja waktu. Kedua indikator ini menjadi dasar dalam memperkirakan biaya akhir proyek maupun durasi akhir proyek, sehingga hubungan antara biaya dan waktu dapat dianalisis secara terpadu dalam sistem EVM.

Pada pendekatan EVM konvensional, prediksi biaya dan durasi umumnya dihitung menggunakan rumus tetap berbasis indeks, seperti CPI dan SPI, sehingga estimasi biaya akhir proyek dan durasi penyelesaian proyek bergantung pada asumsi bahwa kinerja proyek akan tetap mengikuti tren yang sama. Namun pendekatan ini memiliki keterbatasan ketika kondisi proyek berubah atau ketika hubungan antara biaya dan waktu bersifat tidak linear. Oleh karena itu, penelitian ini memanfaatkan pendekatan machine learning melalui algoritma Random Forest untuk menganalisis hubungan tersebut secara lebih fleksibel. Model Random Forest memanfaatkan indikator EVM seperti CPI, SPI, CV, dan SV sebagai variabel input untuk mempelajari pola hubungan antara kinerja biaya dan jadwal proyek terhadap hasil akhir proyek, sehingga mampu menghasilkan prediksi biaya akhir dan durasi akhir proyek yang lebih adaptif dan berpotensi lebih akurat dibandingkan pendekatan EVM berbasis rumus tetap (Ottaviani et al., 2025).

Selain itu, untuk meningkatkan interpretabilitas hasil prediksi biaya konstruksi, model Random Forest dapat dipadukan dengan metode interpretasi seperti SHAP (SHapley Additive exPlanations) sehingga kontribusi setiap variabel input terhadap prediksi biaya dapat dipahami dengan lebih jelas. Dengan demikian, hubungan antara kinerja biaya dan jadwal proyek tidak hanya dapat diprediksi secara

lebih akurat, tetapi juga dapat dijelaskan secara lebih transparan untuk mendukung proses pengambilan keputusan manajerial dalam pengendalian proyek (Alazawy et al., 2025).

1.2.9.5. Hubungan Antar Komponen dalam Alur Kerangka Pemikiran

Secara ringkas, hubungan dalam kerangka pemikiran dapat dijelaskan sebagai berikut: (Ottaviani et al., 2025)

- a. Data proyek (PV, EV, AC, BAC, durasi rencana, durasi aktual) dikumpulkan dan disusun sebagai dataset historis.
- b. Data proyek tersebut diolah menjadi indikator EVM (CPI, SPI, CV, SV) sebagai representasi kinerja biaya dan jadwal.
- c. Indikator EVM digunakan sebagai fitur input bagi model Random Forest untuk mempelajari pola hubungan terhadap hasil akhir proyek.
- d. Model menghasilkan prediksi biaya dan waktu (misalnya EAC cost dan EAC duration) sebagai dukungan kontrol proyek dan pengambilan keputusan.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksplanatori dan prediktif, yang bertujuan untuk menganalisis serta memprediksi kinerja waktu dan biaya proyek konstruksi. Metode yang digunakan adalah kombinasi Earned Value Management (EVM) sebagai metode konvensional pengendalian proyek dan algoritma Random Forest sebagai metode pembelajaran mesin (machine learning) untuk meningkatkan akurasi prediksi.

2.2. Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian ini adalah data historis proyek konstruksi, yang meliputi data kemajuan pekerjaan, durasi, dan biaya proyek. Data diperoleh dari proyek konstruksi gedung/infrastruktur (Pembangunan IPA KAP.500 L/Detik SPAM Regional Mamminasata Provinsi Sulawesi Selatan Tahap 1), yang dilaksanakan pada periode 7 juli 2023 sampai 27 desember 2024.

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Metode yang digunakan untuk mengumpulkan data yang relevan dengan judul penelitian dikenal sebagai teknik pengumpulan data. Tingkat keakuratan data tentu saja sangat mempengaruhi hasil penelitian, maka kelengkapan data sangat penting pada saat mengumpulkan data. Data sekunder adalah jenis data yang digunakan dalam penelitian ini. Yang dimaksud dengan data sekunder ialah data yang dikumpulkan dari sumber yang telah ada. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari konsultan berupa dokumen-dokumen proyek sebagai sumber penelitian. Data sekunder tersebut yaitu:

1. Time Schedule
2. Rancangan Anggaran Biaya
3. Laporan Biaya Bulanan

2.4. Metode Analisa

Setelah data yang dibutuhkan terkumpul, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap data tersebut. Metode analisis yang digunakan untuk mengetahui kinerja serta memprediksi waktu dan biaya akhir proyek pembangunan Masjid Phinisi Kubah Emas adalah metode Earned Value Management (EVM) dan Random Forest Regression.

a. Analisis BCWS, BCWP, dan ACWP

Analisis BCWS, BCWP, dan ACWP dilakukan berdasarkan data Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan time schedule proyek. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kinerja pelaksanaan pekerjaan selama proyek berlangsung serta sebagai dasar pengendalian biaya dan waktu proyek.

b. Analisis Varians dan Indeks Kinerja Proyek

Analisis varians dan indeks kinerja proyek dilakukan untuk mengetahui kesesuaian pelaksanaan proyek terhadap rencana biaya dan jadwal. Varians yang dianalisis meliputi Schedule Variance (SV) dan Cost Variance (CV), sedangkan indeks kinerja yang digunakan adalah Schedule Performance Index (SPI) dan Cost Performance Index (CPI). Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi keterlambatan pekerjaan serta potensi pembengkakan biaya selama proyek berlangsung.

c. Analisis Kinerja dan Progres Proyek

Analisis kinerja dan progres proyek dilakukan berdasarkan nilai SPI dan CPI serta persentase penyelesaian pekerjaan aktual. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai efisiensi waktu dan biaya proyek serta sebagai input utama dalam pemodelan prediksi waktu dan biaya akhir proyek menggunakan algoritma Random Forest.

d. Pemodelan dan Pelatihan Model Prediksi

Pemodelan prediksi dilakukan menggunakan algoritma Random Forest Regression dengan memanfaatkan parameter EVM yaitu PV, EV, AC, SV, CV, SPI, dan CPI sebagai variabel input. Data yang digunakan telah melalui proses preprocessing, normalisasi, serta pembagian data menjadi data latih dan data uji. Pelatihan model dilakukan untuk memperoleh pola hubungan antara kinerja proyek dan estimasi waktu serta biaya akhir proyek.

e. Optimasi Model dan Prediksi Akhir Proyek

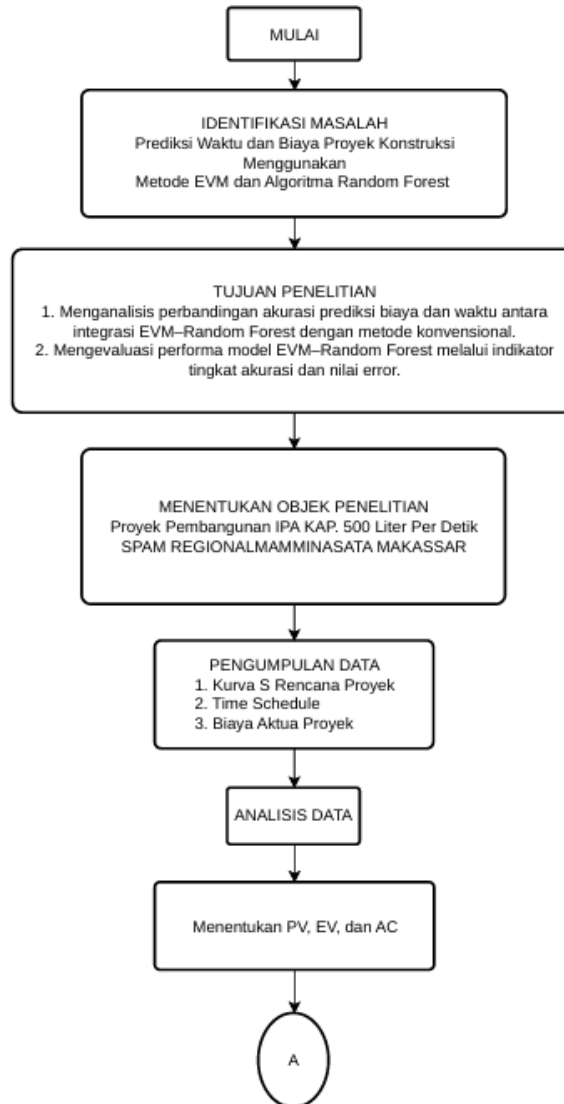
Optimasi model dilakukan melalui penentuan hyperparameter seperti jumlah pohon dan kedalaman maksimum pohon untuk meningkatkan akurasi prediksi. Model yang telah optimal digunakan untuk melakukan prediksi waktu akhir proyek dan prediksi biaya akhir proyek. Hasil prediksi ini digunakan sebagai dasar evaluasi potensi keterlambatan dan pembengkakan biaya proyek.

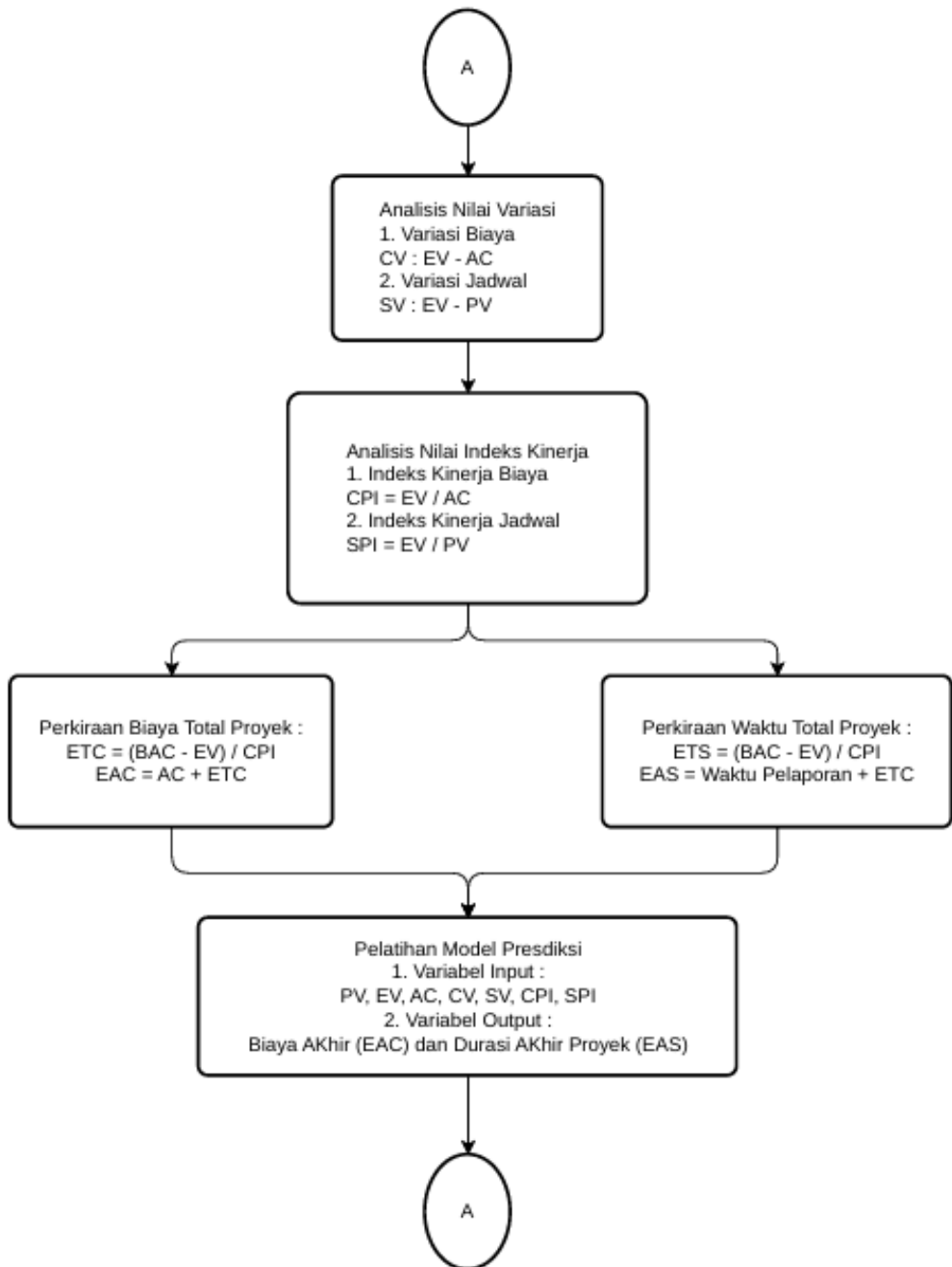
f. Evaluasi Kinerja Model

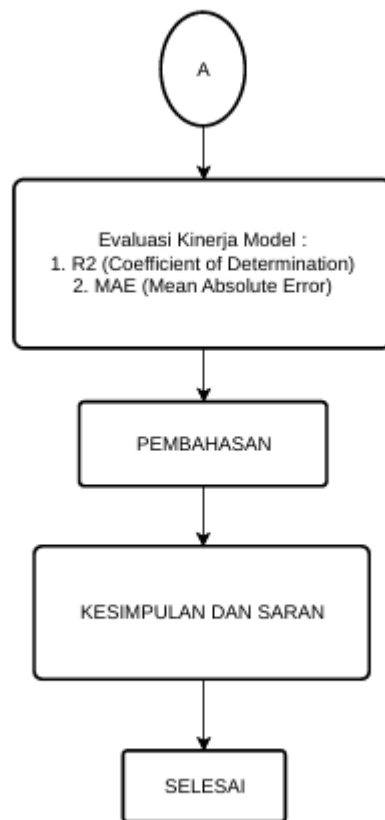
Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan Mean Absolute Error (MAE) dan koefisien determinasi (R^2) untuk menilai tingkat akurasi dan keandalan model prediksi. Model dengan nilai MAE yang rendah dan nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan kemampuan prediksi yang baik.

2.5. Bagan Alir Penelitian

Pada penelitian dikonsepsikan sebuah alur penelitian agar penelitian dapat berjalan secara efektif. Berikut diagram alir tahapan penelitian yang telah disusun dalam melakukan penelitian.







2.6. Perangkat Lunak yang Digunakan

- Microsoft Excel untuk pengolahan data awal
- Python (Scikit-learn, Pandas, NumPy) untuk pemodelan Random Forest