

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penulis akan memaparkan beberapa penelitian terdahulu yang sudah disebutkan diawal latar belakang yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini. Adapun tujuan dari pemaparan ini adalah untuk menentukan posisi peneliti serta menjelaskan perbedaannya. Berikut paparan dari hasil artikel-artikel tersebut:

1. “Perbandingan Metode Prediksi Penyelesaian Proyek *Earned Value Management* dan *Earned Schedule*” oleh Oktavitri & Tenriajeng (2017)

Penelitian pada artikel ini bertujuan menganalisis perbandingan metode *Earned Value Management* (EVM) dan *Earned Schedule* (ES) dalam memprediksi durasi penyelesaian proyek dan menganalisis tingkat akurasi prediksi kedua metode dengan durasi final penyelesaian proyek. Terdapat dua proyek yang dikaji: 1) Proyek A (*Paramount Skyline Tower*) yang memiliki status penyelesaian terlambat, dengan durasi rencana 59 minggu dan durasi final 49 minggu. 2) Proyek B (Gedung Menara 165) yang memiliki status penyelesaian lebih awal, dengan durasi rencana 51 minggu dan durasi final 49 minggu.

Penelitian ini membandingkan indikator kinerja jadwal metode EVM dan ESM diantaranya; SV dan SV(T), kemudian SPI dan SPI(T). Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi tingkat akurasi dari kedua metode dengan menggunakan analisis pengukuran kesalahan prediksi diantaranya; *Mean Squared Error* (MSE), *Mean Absolute Error* (MAD), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Hasil perbandingan SV dan SV(T) berdasarkan status proyek pada Proyek A yang memiliki status penyelesaian terlambat dan Proyek B yang

memiliki status penyelesaian lebih awal adalah sebagai berikut: Untuk Grafik SV dan SV(T) pada Proyek A selama proyek berlangsung dari awal sampai akhir bernilai negatif pada awal proyek (minggu ke-1) sampai minggu ke-5, menunjukkan bahwa kinerja tidak sesuai dengan yang direncanakan (proyek terlambat). Minggu ke-6 sampai minggu ke-39 bernilai positif dikarenakan nilai yang dihasilkan lebih besar dari nilai yang direncanakan ($EV > PV$). Namun pada minggu ke-40 sampai minggu ke-61 (akhir proyek) proyek kembali mengalami kemunduran sehingga durasi penyelesaian lebih lama dua minggu dari yang direncanakan (durasi rencana = 59 minggu). Akhir proyek, SV bernilai 0. Jika $SV = 0$ maka proyek dinyatakan sesuai rencana. Hal ini sangat bertentangan dengan kondisi sesungguhnya dimana proyek terlambat dua minggu. Berbeda dengan SV(T) yang bernilai -2 ($SV < 0$) pada akhir proyek yang sesuai dengan kondisi *real* di lapangan. Untuk SV dan SV(T) pada Proyek B bernilai negatif dari minggu ke-1 sampai minggu ke-35 ($SV < 0$, maka proyek terlambat). Terdapat perbedaan antara SV dan SV(T) dimana pada akhir proyek $SV = 0$ menunjukkan bahwa proyek sesuai dengan rencana yaitu 51 minggu, padahal kondisi yang sebenarnya adalah proyek selesai lebih awal (durasi final = 49 minggu) dari yang direncanakan (durasi rencana = 51 minggu). SV(T) lebih memperlihatkan keadaan sesungguhnya dimana SV(T) bernilai positif pada akhir proyek.

Selanjutnya, hasil perbandingan SPI dan SPI(T) pada Proyek A yang memiliki status penyelesaian terlambat dan Proyek B yang memiliki status penyelesaian lebih awal adalah sebagai berikut: Untuk Proyek A masing-masing grafik membentuk pola tersendiri dimana SPI dan SPI(T) yang diharapkan yaitu sama dengan 1 (kinerja sesuai dengan yang direncanakan). Minggu ke-1 sampai minggu ke-5 SPI dan SPI(T) dibawah 1 yang menunjukkan bahwa kinerja tidak seperti yang diharapkan (proyek terlambat), minggu ke-6 sampai minggu ke-39 SPI dan SPI(T) > 1 yang diartikan bahwa kinerja proyek lebih cepat dari yang direncanakan. Perubahan indeks kinerja kembali terjadi pada minggu ke-40 sampai

minggu ke-61 (akhir proyek) yaitu berada di bawah 1. SPI bernilai 1 pada minggu ke-61 sedangkan $SPI(T) = 0,967$. $SPI(T)$ lebih menunjukkan keadaan yang sesuai dengan kondisi proyek sebenarnya dimana proyek terlambat (durasi final = 61 minggu dengan durasi rencana 59 minggu), maka bernilai dibawah 1 sementara $SPI = 1$. Sedangkan grafik SPI dan $SPI(T)$ pada Proyek B yang memiliki status penyelesaian lebih awal, pada minggu ke-1 sampai minggu ke-35 masing-masing bernilai di bawah 1 yang menunjukkan bahwa kinerja tidak seperti yang direncanakan (proyek terlambat). Minggu ke-36 sampai minggu ke-49 bernilai di atas 1 (kinerja proyek lebih cepat dari yang direncanakan). Akhir proyek, nilai $SPI = 1,023$ dan $SPI(T) = 1,041$. $SPI(T)$ lebih besar dibandingkan SPI yang berarti mendekati kondisi sesungguhnya dimana penyelesaian proyek lebih cepat dari yang direncanakan.

Kedua proyek tersebut diasumsikan antara lain: 1) Kinerja mendatang diharapkan dapat mengikuti jadwal awal (*Performance Factor* (PF) = 1) dan 2) Kinerja mendatang diharapkan dapat mengikuti kinerja waktu saat ini (PF = SPI). Hasil penelitian menunjukkan metode ESM paling akurat dengan kesalahan terkecil yaitu 1) Saat PF = 1, nilai MSE 28,6; MAD 4,8; dan MAPE 8,2% pada Proyek A. Sedangkan Proyek B, nilai MSE 23,8; MAD 4,0; dan MAPE 7,4%. 2) Saat PF = SPI, nilai MSE 8.640,0; MAD 32,5; dan MAPE 22,9% pada Proyek A. Sedangkan Proyek B, nilai MSE 279,7; MAD 13,0; dan MAPE 18,7% pada Proyek B.

Terlihat pada artikel ini bahwa metode ESM lebih mendekati akurat bila dibandingkan dengan metode EVM dalam memprediksi durasi penyelesaian proyek. Nilai MSE, MAD, dan MAPE yang dibandingkan pada penelitian tersebut dilihat dari keseluruhan proyek, tidak membaginya dalam beberapa wilayah kinerja tertentu yang menunjukkan apakah kedua metode tersebut cocok diawal, tengah, atau akhir dalam memprediksi waktu penyelesaian. Berbeda dengan penelitian tersebut, penulis menambahkan satu metode yaitu metode KEVM (*Kalman Filter*

Earned Value Method) dalam perbandingan antara EVM dengan ESM. Perbandingan dalam mengukur akurasi akan dikelompokkan menjadi tujuh rentang persen penyelesaian awal (0% - 35%), tengah (35% - 70%), akhir (70% - 100%), dan keseluruhan (0% - 100%) untuk menentukan apakah suatu metode cocok dalam memprediksi diawal, tengah, atau akhir. Kemudian untuk menentukan apakah salah satu metode lebih cepat mencapai durasi akhir aktual dibandingkan metode lainnya, rentang yang digunakan untuk tujuan ini adalah: 25% - 100%, 50% - 100%, dan 75% - 100%.

2. “Perbandingan Metode *Earned Value*, *Earned Schedule*, dan *Kalman Filter Earned Value* untuk Prediksi Durasi Proyek” oleh Sugiyanto & Gondokusumo (2020)

Penelitian pada artikel ini bertujuan membandingkan akurasi dari ketiga metode yaitu EVM, ESM, dan KEVM. Penelitian ini dilakukan dengan menghitung durasi proyek dari EVM, ESM, dan KEVM pada Proyek Pemeliharaan dan Rekonstruksi Jalan Tol, ada tiga proyek yang dikaji diantaranya: 1) Proyek Pemeliharaan dan Rekonstruksi Jalan Tol Jakarta-Cikampek, 2) Proyek Perubahan Sistem Transaksi pada Jalan Tol Jakarta-Cikampek (Gerbang Tol Cikopo), dan 3) Proyek Jalan Tol Jakarta-Tangerang. Data yang digunakan dari proyek tersebut adalah kurva-S dengan bobot rencana dan realisasi proyek yang sudah selesai. Data tersebut diolah dengan EVM, ESM, dan KEVM untuk mengetahui perbandingan antara ketiga metode prediksi durasi tersebut. Hasil prediksi dari ketiga metode diuji dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).

Hasil nilai MAPE untuk EVM, ESM, dan KEVM dari ketiga proyek menunjukkan bahwa ESM memiliki nilai kesalahan paling kecil dari proyek 1 sebesar 14.9780%, proyek 2 sebesar 13.5544%, dan proyek 3 sebesar 5.1770%. KEVM menunjukkan prediksi yang lebih baik dibandingkan EVM yaitu dari proyek 1 sebesar 26.0246%, proyek 2

sebesar 16.6520%, dan proyek 3 sebesar 9.0468%. Hasil ini menunjukkan bahwa KEVM dapat mengurangi kesalahan setelah dilakukan Filter Kalman pada perkiraan durasi menggunakan EVM. Sedangkan EVM memberikan nilai MAPE terbesar yaitu dari proyek 1 sebesar 31.0737%, proyek 2 sebesar 21.2058%, dan proyek 3 sebesar 14.5436%. Rata-rata EVM sebesar 22.2744%, ESM sebesar 11.2365%, KEVM sebesar 17.2411%.

Perbandingan nilai MAPE untuk EVM, ESM, dan KEVM dari Proyek 1. Pada tahap 1 dari minggu ke-1 sampai ke-20 ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 24.9370%. Pada tahap 2 dari minggu ke-21 sampai ke-36 ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 2.5292%. Keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 14.9780%. Pada tahap 1, tahap 2, dan keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE yang terkecil. Pada tahap 1 KEVM menunjukkan nilai MAPE yang lebih kecil dari EVM tetapi pada tahap 2 EVM lebih kecil dibandingkan KEVM.

Perbandingan nilai MAPE untuk EVM, ESM, dan KEVM dari Proyek 2. Pada tahap 1 dari minggu ke-1 sampai ke-17 ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 22.2769%. Pada tahap 2 dari minggu ke-18 sampai ke-34 ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 4.8319%. Keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 13.5544%. Pada tahap 1, tahap 2, dan keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE yang terkecil. Pada tahap 1 dan tahap 2 KEVM menunjukkan nilai MAPE yang lebih kecil dari EVM.

Perbandingan nilai MAPE untuk EVM, ESM, dan KEVM dari Proyek 3. Pada tahap 1 dari minggu ke-1 sampai ke-11 ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 8.2197%. Pada tahap 2 dari minggu ke-12 sampai ke-22 EVM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu 0.9987%. Keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE terkecil yaitu

5.1770%. Pada tahap 1, dan keseluruhan proyek ESM menunjukkan nilai MAPE yang terkecil sedangkan di tahap 2 EVM menunjukkan nilai MAPE yang terkecil.

Hasil perbandingan dari penggunaan ketiga metode tersebut memperlihatkan bahwa pada tahap awal tidak dapat digunakan untuk memprediksi durasi proyek, pada tahap setelah separuh proyek berjalan baru prediksi durasi proyek dapat digunakan. Dari hasil tersebut, artikel ini mencoba mengukur akurasi dari ketiga metode menggunakan data dari proyek jalan tol. Untuk membuat analisis yang berbeda dari perbandingan antara ketiga metode, penulis mencoba membandingkan KEVM bersama dengan metode yang lain dengan menggunakan data proyek bangunan gedung. Selain itu, penulis menambahkan kriteria pengukuran prediksi yaitu ketepatan waktu dan stabilitas. Untuk melihat apakah ketiga metode cocok diawal, tengah, akhir, keseluruhan atau untuk menentukan apakah salah satu metode lebih cepat mencapai durasi akhir aktual dibandingkan metode lainnya, penulis membagi tujuh pengelompokan untuk mengukur akurasi, ketepatan, dan stabilitas dengan rentang penyelesaian awal (0% - 35%), tengah (35% - 70), akhir (70% - 100%), keseluruhan (0% - 100%), dan 25% - 100%, 50% - 100%, 75% - 100%.

3. “Analisis Kinerja Biaya dan Waktu menggunakan Metode *Earned Value* dan *Earned Schedule* pada Proyek Pembangunan Villa Pasir Angin Puncak-Bogor” oleh Sakinah (2021)

Penelitian pada artikel ini bertujuan untuk menganalisa kinerja dengan menggunakan metode EVM dan ESM untuk mengetahui hasil prestasi kinerja pada pelaksanaan proyek pembangunan villa dan melihat seberapa besar atau kecil penyimpangan yang terjadi di pekerjaan Pembangunan Villa Pasir Angin di Bogor. Penelitian pada artikel ini menggunakan data sekunder yang diambil dari proyek berupa Rencana Anggaran Biaya (RAB), *Time Schedule*, Laporan Mingguan Proyek, dan Laporan Keuangan Proyek. RAB pada proyek ini sebesar Rp.

2.042.722.393,94,- dengan waktu pelaksanaan 168 hari kalender. Sedangkan laporan mingguan proyek yang ditinjau yaitu dari minggu ke-1 sampai dengan minggu ke-16.

Setelah data didapatkan, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah menganalisis data menggunakan metode EVM dan ESM. Tahapan analisis data yang dilakukan menggunakan EVM adalah sebagai berikut: 1) Analisa Waktu dan Biaya (BCWS, BCWP, ACWP), 2) Analisa Varian (CV dan SV), 3) Analisa Indeks Kinerja (CPI dan SPI), dan 4) Estimasi Waktu dan Biaya (ETC, EAC, ETC, dan EAS). Kemudian menganalisis data menggunakan ESM: 1) Analisa Waktu dan Biaya ($ES(t)$), 2) Analisa Varian ($SV(T)$), 3) Analisa Indeks Kinerja ($SPI(T)$). Terakhir, menganalisa faktor kemajuan atau keterlambatan proyek.

Hasil dari EVM, nilai BCWP terhadap BCWS dari minggu ke-1 sampai minggu ke-16 selalu diatas garis BCWS, dapat disimpulkan bahwa pekerjaan berjalan lebih cepat dari yang direncanakan diawal tetapi kinerja BCWP terhadap ACWP diproyek mengeluarkan biaya anggaran yang lebih besar dari rencana. Kinerja biaya dari minggu ke-1 sampai minggu ke-16 menunjukkan perbaikan dan tidak mengalami kerugian dengan nilai $CPI > 1$ dan $SPI > 1$. Sedangkan untuk hasil perhitungan ESM, nilai indeks kinerja $SPI(T) < 1$ dengan $SV(T)$ negatif, artinya proyek perlu melakukan perbaikan kinerja. Proyek ini diprediksikan mengalami keterlambatan dengan nilai durasi akhir menjadi 236 hari dari durasi rencana awal yaitu 217 hari.

Berbeda dengan artikel pertama, artikel ini tidak mengukur akurasi nilai prediksi yang dibandingkan dengan durasi final, sehingga ketepatan prediksi waktu masih belum final dan dapat berubah sewaktu-waktu apabila terdapat percepatan proyek yang dilakukan pelaksana proyek. Berbeda dari artikel ini, penelitian yang penulis lakukan akan membandingkan hasil prediksi terhadap hasil aktual (final) proyek, sehingga hasil prediksi dapat terlihat perbedaannya dengan hasil final.

Berapa selisih antara total waktu aktual dengan nilai prediksi waktu penyelesaian, apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara total waktu rencana dengan total waktu aktual.

4. “Penerapan Metode *Earned Value* dan *Earned Schedule* Pelaksanaan Proyek Rumah Sakit X di Bandung” oleh Tangtobing & Waty (2023)

Penelitian pada artikel ini bertujuan memperkirakan waktu selesai proyek menggunakan metode *Earned Value* (EVM) dan *Earned Schedule* (ESM). Penelitian yang dilakukan menggunakan data riil salah satu proyek Rumah Sakit di Bandung. Data yang digunakan diantaranya Rencana Anggaran Biaya (RAB), *Time Schedule* pelaksanaan proyek (Kurva-S), dan Laporan Progress Kinerja Mingguan. Pelaksanaan proyek tersebut tidak sesuai dengan *schedule* yang direncanakan. Pada proyek ini direncanakan akan selesai dalam 331 hari, sedangkan pelaksanaan proyek tersebut diselesaikan dalam 364 hari, dimana terdapat keterlambatan sebesar 33 hari. Hal ini yang menjadi landasan peneliti untuk memperkirakan waktu dan biaya penyelesaian untuk mengetahui estimasi waktu dan biaya yang dibutuhkan menggunakan EVM dan ESM.

Analisis data dilakukan dengan tiga tahapan: 1) Perhitungan dengan metode EVM: menghitung SV, SPI, perkiraan waktu untuk sisa pekerjaan (ETS), dan perkiraan waktu selesai proyek (EAS). 2) Perhitungan dengan metode ESM: menghitung nilai *Earned Schedule* (ES) dan nilai *Increment* (I), menghitung $SV(T)$, $SPI(T)$, dan perkiraan waktu selesai proyek ($IEAC(t)$). 3) Menganalisis perbandingan perkiraan penyelesaian proyek antara metode EVM dan ESM dengan melihat metode mana yang memiliki hasil lebih mendekati dengan waktu yang direncanakan dan waktu aktual selesainya proyek.

Proyek rumah sakit ini sudah selesai baik struktur maupun arsitektur. Dalam pengerjaannya proyek tersebut dilakukan 2 kali revisi *master schedule* yang dikarenakan tidak tercapainya target rencana proyek

atau terlambat dari rencana. Berdasarkan perubahan *master schedule* yang terjadi, maka peneliti melakukan penelitian pada 3 kondisi yaitu pada *master schedule* awal dilakukan perhitungan pada minggu ke-30, kemudian berdasarkan revisi *master schedule* yang pertama dilakukan perhitungan pada minggu ke-45, dan dilakukan juga perhitungan berdasarkan revisi *master schedule* yang kedua pada minggu ke-49. Pada kurva-S awal, rencana waktu pekerjaan dari proyek rumah sakit X di daerah Bandung ini direncanakan selama 331 hari atau 48 minggu, yaitu dari 2 Agustus 2018 sampai dengan 28 Juni 2022. Kemudian terjadi penurunan kinerja proyek dari minggu ke-24 hingga minggu ke-30, dimana penyimpangan antara BCWS dan BCWP sebesar -9,855% pada minggu ke-30. Pada minggu ke-31 dilakukan revisi *master schedule*. Setelah dilakukan revisi *master schedule*, kinerja proyek tidak terlalu baik sehingga jika dilihat kinerja proyek dari minggu ke-31 sampai minggu ke-46, nilai BCWP dibawah BCWS yang berarti proyek mengalami keterlambatan. Oleh karena itu, pihak proyek memutuskan untuk melakukan revisi *master schedule* lagi dikarenakan waktu penyelesaian proyek direncanakan selesai dalam minggu ke-48 yang berarti tersisa 2 minggu untuk menyelesaikan proyek yang dianggap tidak cukup. Berdasarkan data kurva-S, dilakukan revisi *master schedule* pada minggu ke-46 dan waktu penyelesaian proyek mundur dari 48 minggu ke 52 minggu. Jika dilihat antara grafik BCWP dan BCWS dari minggu ke-46 sampai minggu ke-52, kinerja proyek rata-rata sama dengan rencana sehingga proyek rumah sakit ini selesai sesuai rencana waktu pengerjaan proyek yaitu pada minggu ke-52. Nilai BCWS dan BCWP pada proyek tersebut dilakukan perhitungan memakai metode EVM dan ESM. Dikarenakan terdapat 2 kali revisi kurva-S sehingga pada penelitian ini dilakukan perhitungan berdasarkan 3 kondisi yaitu pada minggu-30, minggu ke-45, dan minggu ke-49.

Hasil perbandingan BCWS dan BCWP untuk ketiga periode waktu tersebut adalah sebagai berikut: Pada minggu ke-30, nilai BCWS sebesar

Rp. 28.887.409.091 sedangkan nilai BCWP sebesar Rp. 24.183.886.363. Pada minggu ke-45, nilai BCWS didapatkan Rp. 46.389.000.000 sedangkan nilai BCWP sebesar Rp. 41.559.568.182. Pada minggu ke-49, nilai BCWS sebesar Rp. 46.298.318.182 sedangkan nilai BCWP sebesar Rp. 46.196.181.818. Berdasarkan perbandingan BCWS dan BCWP tersebut, nilai BCWP pada minggu ke-30, minggu ke-45, dan minggu ke-49 lebih rendah daripada nilai BCWS yang berarti pada periode waktu tersebut pekerjaan proyek rumah sakit ini terlaksana lebih lambat dari yang direncanakan.

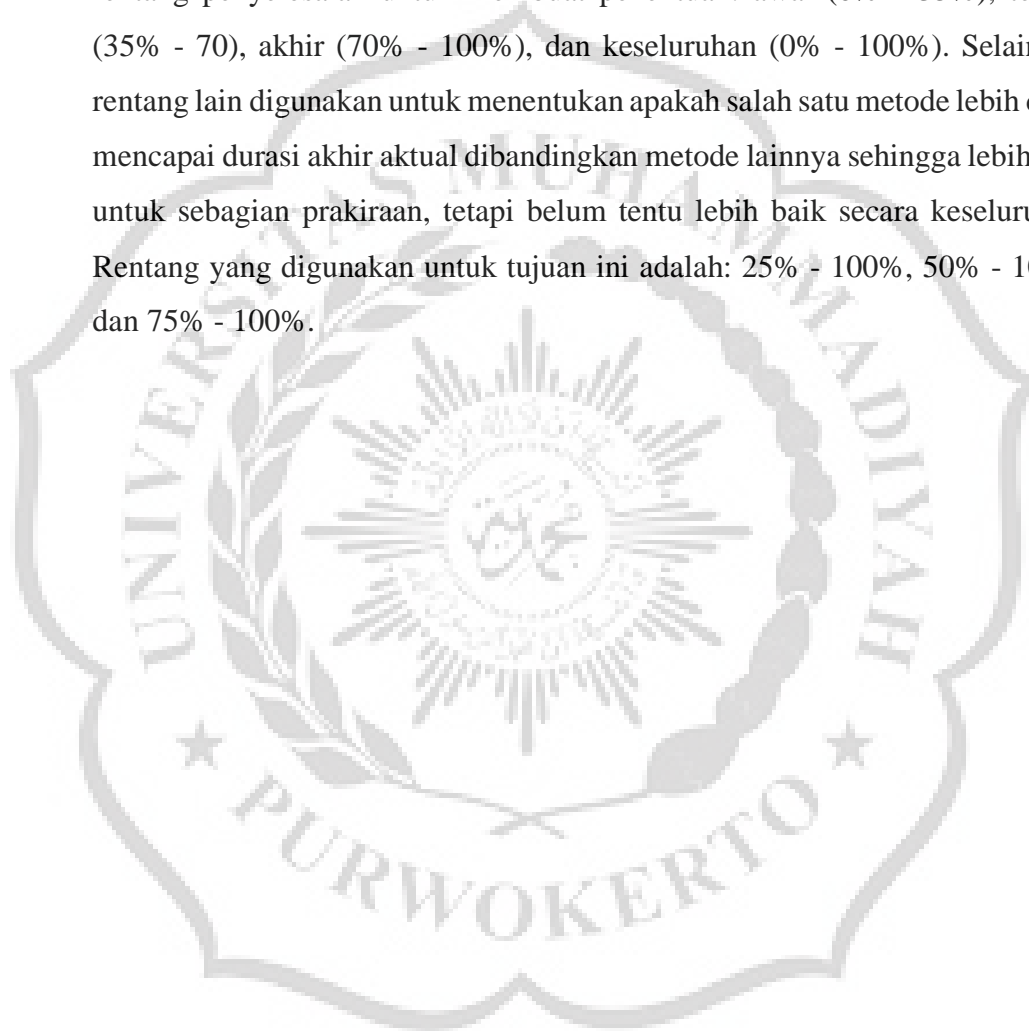
Hasil perhitungan nilai *Schedule Variance* (SV) dan *Schedule Variance (Time)* (SV(T)) pada minggu ke-30 dan minggu ke-45 memiliki nilai negatif yang cukup besar. Hal itu dikarenakan pada minggu ke-30 dan minggu ke-45 merupakan periode awal sebelum dilakukannya revisi *master schedule* sehingga penyimpangan yang terjadi memiliki nilai yang cukup besar, jika dilihat berdasarkan grafik perbandingan BCWS dan BCWP, besaran nilai SV dan SV(T) berbanding lurus dengan perbedaan antara BCWS dan BCWP pada periode tersebut. Nilai SV dan SV(T) yang negatif memiliki arti bahwa pelaksanaan pekerjaan proyek lebih lama dari yang direncanakan atau dapat dibilang terlambat. Demikian juga sama halnya dengan perhitungan pada minggu ke-49 dimana memiliki hasil negatif yang tidak terlalu baik dari perhitungan metode EVM dan ESM, karena pada periode minggu ke-49 proyek sudah mendekati tahap penyelesaian akhir sehingga pada minggu ke-49 tidak terjadi penyimpangan yang begitu besar. Hal ini didukung oleh hasil perhitungan indeks kinerja jadwal SPI dan SPI(T). Nilai indeks kinerja jadwal yang didapatkan baik dari metode EVM dan ESM memiliki nilai dibawah angka satu (< 1) yang berarti kinerja proyek pada periode minggu ke-30, minggu ke-24, dan minggu ke-49 lebih lambat dari waktu atau jadwal yang direncanakan.

Hasil perhitungan dengan metode EVM mendapatkan estimasi waktu penyelesaian proyek (EAS) pada minggu ke-30 yaitu 51,5 minggu dari waktu rencana 48 minggu, pada minggu ke-45 didapatkan 48,35 minggu dari waktu rencana 48 minggu, dan pada minggu ke-49 didapatkan 52,01 minggu dari waktu rencana 52 minggu. Sedangkan hasil perhitungan berdasarkan metode ESM mendapatkan estimasi waktu penyelesaian proyek ($IEAC(t)$) untuk minggu ke-30 yaitu 53,18 minggu dari waktu rencana 48 minggu, pada minggu ke-45 didapatkan 51,537 minggu dari waktu rencana 48 minggu, dan pada minggu ke-49 minggu didapatkan 52,136 dari waktu rencana 52 minggu. Hasil perkiraan waktu akhir proyek dengan metode EVM lebih akurat daripada metode ESM. Tetapi berdasarkan hasil perhitungan minggu ke-45 metode ESM lebih akurat terhadap waktu aktual selesai proyek.

Artikel ini menunjukkan perubahan hasil kinerja proyek pada kondisi deviasi yang cukup besar dan terlihat dari hasil analisis varian dan analisis indeks kinerja, yang diikuti dengan hasil perkiraan waktu proyek bahwa terjadi keterlambatan dari perhitungan indikator kinerja metode EVM dan ESM. Dari hasil artikel ini, EVM dan ESM dapat digunakan untuk menilai kinerja dan memprediksi waktu akhir proyek, meskipun terdapat hasil yang berbeda diantara kedua metode tersebut, menurut peneliti hal ini dikarenakan bahwa metode ESM menggunakan satuan unit waktu dalam perhitungannya, sedangkan EVM menerima varian waktu dari parameter biaya (satuan moneter). Berbeda dengan penelitian tersebut, penulis menambahkan satu metode yaitu metode KEVM (*Kalman Filter Earned Value Method*) dalam perbandingan antara EVM dengan ESM.

Sebagaimana yang sudah dijelaskan di muka bahwa dengan adanya penelitian terdahulu ini, dimaksudkan` untuk memperjelas posisi penelitian yang penulis lakukan. Penelitian ini mempunyai titik perbedaan dengan penelitian terdahulu. Titik tersebut ada pada proyek yang ditinjau yaitu Proyek

Peningkatan Terminal Tipe C Banjarharjo yang berlokasi di Kecamatan Banjarharjo, Kabupaten Brebes, Jawa Tengah. Selain itu, penelitian ini akan membandingkan hasil indikator prediksi waktu yang dimiliki metode EVM, ESM, dan KEVM berdasarkan akurasi, ketepatan, dan stabilitas dari metode-metode tersebut. Masing-masing pengukuran dikelompokkan dengan tujuh rentang penyelesaian untuk membuat penentuan: awal (0% - 35%), tengah (35% - 70), akhir (70% - 100%), dan keseluruhan (0% - 100%). Selain itu, rentang lain digunakan untuk menentukan apakah salah satu metode lebih cepat mencapai durasi akhir aktual dibandingkan metode lainnya sehingga lebih baik untuk sebagian prakiraan, tetapi belum tentu lebih baik secara keseluruhan. Rentang yang digunakan untuk tujuan ini adalah: 25% - 100%, 50% - 100%, dan 75% - 100%.



B. Standar dan Regulasi EVM

Earned Value Management (EVM) adalah metode pengendalian yang memungkinkan manajer proyek mengukur kinerja proyek dalam dimensi waktu dan biaya relatif terhadap nilai dasar (Batselier & Vanhoucke, 2015; Vanhoucke dkk., 2016). Ini dirancang sebagai alat analisis keuangan oleh Departemen Pertahanan AS (DoD) pada tahun 1960an. Namun hingga awal tahun 1980-an, hal ini masih diabaikan oleh manajer proyek. Namun ada tiga peristiwa yang mempercepat penerapannya. Pertama, artikel yang diterbitkan di Majalah Pekerjaan Umum oleh David Burstein pada tahun 1979, yang menggambarkan bagaimana EVM telah berhasil diterapkan di sebuah perusahaan arsitektur dan konstruksi (Hickson & Owen, 2015). Peristiwa kedua adalah pembatalan Program A-12 Avenger II Angkatan Laut oleh Departemen Pertahanan, karena masalah kinerja yang baru terdeteksi setelah penerapan EVM (Kwak & Anbari, 2012). Ketiga, publikasi standar industri EVM oleh *American National Standards Institute* (ANSI EIA 748-A). Sejak saat itu, adopsi EVM menyebar dengan sangat cepat, terutama setelah teknik ini dimasukkan dalam panduan Badan Pengetahuan Manajemen Proyek oleh *Project Management Institute* (PMBOK Guide-PMI) yang pertama pada tahun 1987. Teknik ini kemudian diadopsi oleh banyak lembaga pemerintah AS, misalnya Badan Penerbangan dan Antariksa Nasional dan Departemen Energi (NASA). Baru-baru ini, EVM juga telah distandarisasi di kawasan seperti Australia (AS 4817-2003/2006) dan Eropa (ISO 21508:2018). Sejalan dengan penerapannya oleh pemerintah, praktisi, sertifikasi, dan badan profesional, EVM juga mendapat perhatian penelitian yang luas (Vanhoucke, 2011; Barrientos-Orellana dkk., 2021).

C. Pengukuran Kinerja Waktu

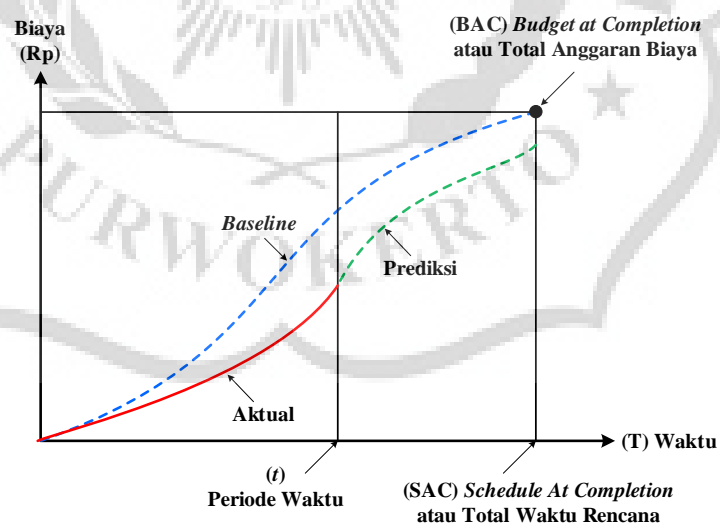
Sistem manajemen proyek konstruksi berfokus pada bagaimana mencapai keunggulan dalam pengawasan dan pengendalian kinerja proyek melalui pengurangan keterlambatan waktu. Studi pada industri konstruksi telah mendorong hal tersebut untuk memberikan kejelasan laporan dalam membantu pengambilan keputusan. Proses pelaporan status melibatkan pengelolaan perubahan dalam memperbarui *baseline* proyek. Dengan demikian, laporan status proyek harus mencakup pengukuran kemajuan dan estimasi pada saat penyelesaian untuk menggambarkan kondisi saat ini dan yang akan datang.

Indikator kinerja jadwal telah berevolusi untuk menggambarkan kondisi riil proyek. Indikator kinerja adalah ukuran yang digunakan untuk menilai dan mengevaluasi kinerja proyek. Metrik-metrik yang terdapat pada indikator kinerja ini digunakan untuk melacak kemajuan, mengidentifikasi area untuk perbaikan dan membuat keputusan berbasis data. Indikator kinerja dapat bervariasi tergantung pada konteks spesifik dan tujuan proyek. Indikator kinerja yang digunakan pada penelitian ini merujuk pada aspek waktu proyek konstruksi. Indikator kinerja yang dimiliki metode EVM dan ESM akan digunakan untuk membantu mengukur kinerja waktu proyek konstruksi dan memberikan informasi tentang efektivitas dan efisiensinya.

Meskipun serangkaian indikator kinerja proyek bervariasi, ada indikator lain yang terintegrasi dengan indikator kinerja, yaitu indikator prediksi. Indikator prediksi digunakan untuk membuat estimasi waktu penyelesaian. Perbedaan kedua indikator ini adalah indikator kinerja memberikan ukuran kinerja saat ini, sementara indikator prediksi digunakan untuk memprediksi kinerja mendatang berdasarkan data dan tren historis.

D. Prediksi Waktu Penyelesaian

Prediksi adalah proses menggunakan informasi mengenai status proyek saat ini dan mengekstrapolasinya untuk memvisualisasikan kinerja pada akhir proyek. Prediksi waktu penyelesaian dimaksudkan untuk memastikan jumlah waktu yang tersisa yang diperlukan untuk menyelesaikan kegiatan dalam lingkup pekerjaan. Untuk memahami nilai prediksi dapat dilihat pada Grafik Kurva Nilai Prediksi yang tertera dalam Gambar 2.1. Prediksi waktu pada akhir proyek dapat dihasilkan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu pendekatan deterministik dan probabilistik. Pendekatan deterministik memperkirakan nilai penyelesaian berdasarkan estimasi dari titik nilai yang paling mungkin, sedangkan pendekatan probabilistik mempertimbangkan variabilitas nilai durasi saat memperkirakan nilai pada akhir proyek (Fozveh, 2020). Indikator prediksi metode *forecasting* adalah alat ukur atau metrik yang digunakan untuk memprediksi hasil berdasarkan data tren atau pola historis. Indikator prediksi EVM dan ESM menggunakan pendekatan deterministik, sedangkan KEVM menggunakan pendekatan probabilistik.



Gambar 2.1 Grafik Kurva Nilai Prediksi

E. *Earned Value Management (EVM)*

Pemantauan dan pengendalian proyek membutuhkan pengetahuan tentang bagaimana menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut: kapan perkiraan tanggal penyelesaian proyek, berapa biaya yang dikeluarkan proyek sejauh ini, dan berapa total biaya penyelesaian proyek. Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, harus dipahami bahwa selama pelaksanaan proyek berlangsung, sangat penting untuk memastikan apakah proyek berjalan sesuai jadwal (waktu), sesuai anggaran (biaya) dan berapa banyak pekerjaan yang telah diselesaikan (ruang lingkup) (Mayo-Alvarez dkk., 2022). Analisis manajemen waktu dan biaya tradisional dalam mengukur penyimpangan suatu variabel (waktu dan biaya) hanya membandingkan dan mengukur selisih antara nilai rencana dan nilai aktual dari variabel tersebut. Misalnya, ketika mencoba menentukan variasi dalam biaya proyek, jika membandingkan akumulasi biaya aktual proyek dengan biaya yang diusulkan, analisis ini tidak lengkap karena proyek mungkin telah menghabiskan 90% anggaran, namun hanya menyelesaikan 50% dari proyek. Dengan kata lain, analisis biaya tradisional ini tidak menunjukkan apakah proyek berjalan dengan baik, karena gagal memberikan informasi mengenai pekerjaan yang dilaksanakan (ruang lingkup yang diselesaikan) (Urgilés dkk., 2019).

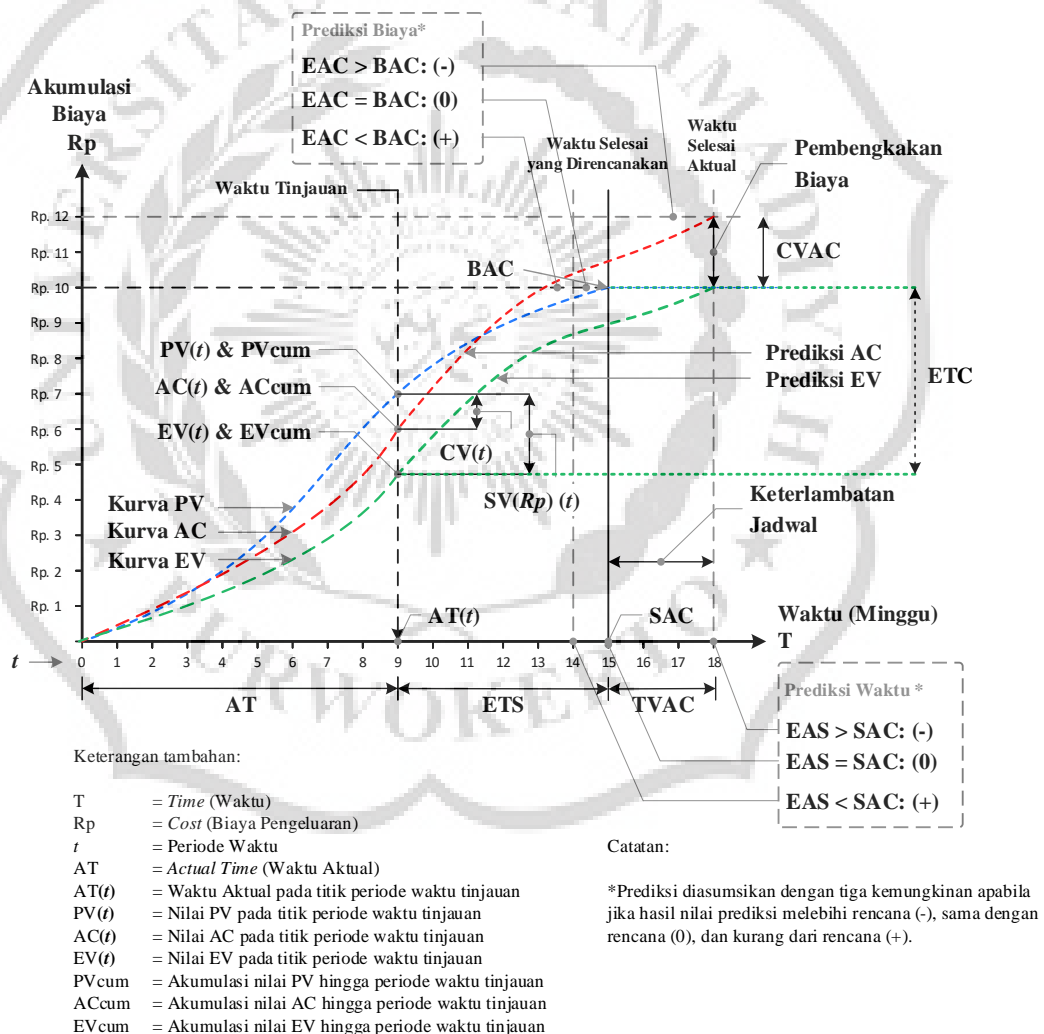
Dalam analisis tradisional yang disebutkan diatas, hanya dua variabel yang dibandingkan, yaitu: *Planned Value* (PV) merupakan biaya yang dianggarkan untuk rencana pekerjaan dan *Actual Costs* (AC) merupakan biaya aktual yang dikeluarkan proyek. PV dikaitkan dengan dan mewakili jadwal proyek dalam satuan moneter, dan AC dikaitkan dengan biaya aktual dalam satuan moneter. Kesenjangan dalam perbandingan ini tidak mencakup variabel ketiga: ruang lingkup proyek. Untuk memasukkannya ke dalam analisis, pertama-tama nilainya harus diubah menjadi satuan moneter. Hal ini dicapai melalui konsep *Earned Value* (EV) atau biaya yang dikeluarkan berdasarkan pekerjaan yang diselesaikan, yang mengaitkan variabel ruang lingkup pekerjaan ke dalam satuan moneter (Aramali dkk., 2021).

Istilah “*Earned Value*” berasal dari gagasan bahwa setiap hasil proyek memiliki biaya pengeluaran yang sudah dianggarkan, yang disebut sebagai “*Value*”. Ketika pekerjaan selesai, proyek telah mendapatkan “*Value*” ini. *Earned Value Management* (EVM) menggabungkan tiga variabel sebagai indikator dasar yang mengaitkan: ruang lingkup pekerjaan, jadwal, dan anggaran. Untuk itu, perlu menghitung tiga nilai berikut: 1) *Planned Value* (PV) yang berkaitan dengan jadwal dalam satuan moneter. 2) *Actual Costs* (AC) yang berkaitan dengan biaya aktual dalam satuan moneter. 3) *Earned Value* (EV) yang berkaitan dengan ruang lingkup pekerjaan dalam satuan moneter (Zahoor dkk., 2021).

EVM adalah metodologi yang digunakan untuk mengukur dan mengkomunikasikan kemajuan fisik nyata suatu proyek dengan mempertimbangkan pekerjaan yang diselesaikan, waktu yang dibutuhkan dan biaya yang dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerjaan tersebut (Fleming & Koppelman, 2016). Dari hasil pengukuran kita dapat menentukan sejauh mana kinerja proyek dari sisi waktu (*schedule*) maupun dari sisi biaya (*cost*). Dengan perhitungan EVM tersebut kita dapat menentukan apakah proyek masih *on schedule & on budget* atau sebaliknya *behind schedule & over-budget*. Ringkasnya, EVM adalah metode penilaian yang memberikan angka keberhasilan atau kerugian proyek dari indikator yang dimilikinya.

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, EVM menggunakan tiga metrik yang menjadi indikator dasar dalam konsepnya, ketiganya dinyatakan dalam satuan biaya: PV (*Planned Value*), EV (*Earned Value*), dan AC (*Actual Cost*). Namun, pada penelitian ini hanya digunakan metrik untuk mengukur kinerja waktu dan prediksi waktu penyelesaian, sehingga AC tidak dilibatkan. Setelah menggunakan kedua metrik tersebut (PV dan EV), pengukuran kinerja dapat dilakukan dengan mencari hasil dari metrik yang dimiliki indikator kinerja waktu: SV (*Schedule Variance*) dan SPI (*Schedule Performance Index*). Kemudian menggunakan ukuran kinerja proyek saat ini untuk memperkirakan waktu penyelesaian, *Estimate All Schedule* (EAS). Namun, sebelum

menggunakan indikator dasar, ada beberapa data yang dibutuhkan, yaitu *Budget At Completion* (BAC) atau nilai kontrak proyek dan *Schedule At Completion* (SAC) atau total waktu rencana proyek. Untuk memahami hubungan dan keterkaitan antar metrik dari indikator EVM, akan disajikan Grafik Kurva EVM yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan penjelasan mengenai masing-masing metrik pada setiap indikator akan dipaparkan pada bagian selanjutnya. Metode EVM akan terlalu luas untuk dijelaskan sepenuhnya disini dan pengenalan yang lebih lengkap dapat ditemukan di Fleming & Koppelman (2016).



Gambar 2.2 Grafik Kurva EVM

Referensi Gambar: Mayo-Alvarez et al. (2022); Lipke (2012).

1. Indikator Dasar EVM (Waktu)

Berikut merupakan beberapa metrik yang digunakan sebagai indikator dasar untuk melakukan analisis kinerja menggunakan metode EVM:

a. *Planned Value (PV)*

PV adalah metrik yang digunakan untuk menghitung nilai biaya rencana yang dianggarkan untuk melaksanakan pekerjaan pada periode waktu tertentu. Pada periode waktu yang ditinjau, PV disebut sebagai $PV(t)$, t disini merupakan periode waktu (hari, minggu, bulan). Pada penelitian ini, periode waktu yang digunakan adalah minggu. PV juga dikenal dengan nama lain *Budget Cost of Work Scheduled (BCWS)*. Nilai $PV(t)$ mewakili perkiraan biaya pekerjaan yang harus diselesaikan pada titik waktu tersebut berdasarkan jadwal proyek yang telah disusun. Nilai $PV(t)$ memberikan gambaran tentang bagaimana seharusnya biaya proyek terdistribusi sepanjang waktu, ini membantu dalam mengevaluasi apakah proyek sedang berjalan sesuai dengan rencana atau tidak. Dalam metode EVM, PV ditetapkan sebagai *baseline* atau *PMB (Performance Measurement Baseline)* yang digunakan untuk mengukur kemajuan proyek yang sebenarnya. *Baseline* ini harus tetap, tidak boleh berubah untuk keseluruhan proyek, kecuali jika ruang lingkup proyek diubah atau jika *dynamic scheduling* diterapkan (Rojo, 2014). $PV(t)$ dapat dihitung melalui rumus berikut (Czarnigowska, 2008; Castollani dkk., 2020):

$$PV(t) = \text{Bobot Rencana}(\%) (t) / 100 \times \text{BAC}$$

dimana,

- Bobot Rencana (%) (t) adalah persentase dari bobot pekerjaan yang direncanakan untuk dilaksanakan selama periode waktu t . Persentase bobot rencana dapat diketahui pada Jadwal Rencana Pekerjaan (*Time Schedule*) Proyek.
- Sedangkan, BAC (*Budget At Completion*) ialah nilai kontrak proyek. BAC dapat diketahui pada rekapitulasi RAB Proyek.

Sedangkan untuk menghitung PV_{cum} , dapat dihitung melalui rumus berikut:

$$PV_{cum} = \text{Kumulatif Bobot Rencana}(\%) (t) / 100 \times BAC$$

dimana,

- Kumulatif Bobot Rencana (%) (t) adalah persentase dari akumulasi bobot pekerjaan yang direncanakan untuk dilaksanakan sampai periode waktu t . Persentase bobot rencana dapat diketahui pada Jadwal Rencana Pekerjaan (*Time Schedule*) Proyek.

b. Earned Value (EV)

EV adalah metrik kunci dalam metode EVM, metrik ini digunakan untuk menghitung nilai biaya sesungguhnya yang didapat dari pekerjaan yang telah selesai dilaksanakan pada periode waktu tertentu. Pada periode waktu yang ditinjau, EV disebut sebagai $EV(t)$. EV juga dikenal dengan nama lain *Budget Cost of Work Performed (BCWP)*. $EV(t)$ dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Czarnigowska, 2008; Castollani dkk., 2020):

$$EV(t) = \text{Bobot Realisasi}(\%) (t) / 100 \times BAC$$

dimana,

- Bobot Realisasi (%) (t) adalah persentase dari akumulasi bobot pekerjaan yang terlaksana sampai periode waktu t . Persentase bobot realisasi dapat diketahui pada Laporan Kemajuan Mingguan proyek.

Sedangkan untuk menghitung EV_{cum} dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$EV_{cum} = \text{Kumulatif Bobot Realisasi}(\%) (t) / 100 \times BAC$$

dimana,

- Kumulatif Bobot Realisasi (%) (t) adalah persentase dari akumulasi bobot pekerjaan yang terlaksana sampai periode waktu t . Persentase bobot realisasi dapat diketahui pada Laporan Kemajuan Mingguan proyek.

Nilai EV memberikan gambaran tentang nilai aktual dari pekerjaan yang telah diselesaikan dari awal hingga titik waktu tertentu dalam proyek. Ini membantu dalam mengevaluasi seberapa baik proyek dalam menyelesaikan setiap pekerjaan sampai periode waktu itu, apakah menghasilkan nilai sesuai

dengan rencana yang telah ditetapkan (PV) atau tidak, lebih cepat atau lebih lambat. Hal ini akan diketahui pada perhitungan metrik $SV(Rp)$.

2. Indikator Kinerja Waktu EVM

a. *Schedule Variance (SV(Rp))*

$SV(Rp)$ adalah metrik yang digunakan untuk mengukur selisih antara nilai PV dengan EV. SV disini dibedakan oleh satuan yang digunakan, hasil dari SV metode EVM menggunakan satuan moneter, sehingga disimbolkan dengan (Rp) , berbeda dengan SV dari metode ESM yang menggunakan satuan waktu (T). Selisih tersebut akan diukur pada periode waktu peninjauan, pada saat itu SV disebut sebagai $SV(Rp)(t)$. Dalam SV , nilai varian berfungsi untuk memberikan informasi tentang status kemajuan proyek dari segi jadwal, namun karena EVM menggunakan data biaya untuk mengukur kemajuan jadwal, maka bukan waktu atau durasi yang dijadikan *output* dari perhitungan, tetapi nilai biaya. $SV(Rp)$ hampir sama dengan CV , namun berbeda pada tolak ukur yang digunakan, jika CV menggunakan $AC(t)$, $SV(Rp)$ menggunakan $PV(t)$. Maka kemajuan jadwal diukur untuk mengetahui, apakah nilai pekerjaan yang diselesaikan pada periode waktu itu kurang, sesuai, atau melebihi nilai pekerjaan yang direncanakan. Rumus untuk menghitung $SV(Rp)(t)$ adalah (Czarnigowska, 2008; Rojo, 2014):

$$SV(Rp)(t) = EV_{cum} - PV_{cum}$$

Hasil dari perhitungan $SV(Rp)(t)$ bisa positif, negatif, atau nol, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika $SV(Rp)(t)$ positif ($SV(Rp)(t) > 0$): Itu berarti, nilai pekerjaan yang diselesaikan lebih banyak dari nilai pekerjaan yang direncanakan selama waktu itu. Nilai $SV(Rp)(t)$ positif menunjukkan bahwa pengeluaran biaya proyek yang dihasilkan berdasarkan pekerjaan yang telah selesai kurang dari nilai pekerjaan yang direncanakan, proyek dianggap sedang berjalan lebih cepat dari jadwal.

- Jika $SV(Rp)(t)$ sama dengan nol ($SV(Rp)(t) = 0$): Itu berarti, nilai pekerjaan yang diselesaikan sama dengan nilai pekerjaan yang direncanakan selama waktu itu. Nilai $SV(Rp)(t)$ sama dengan nol menunjukkan bahwa pengeluaran biaya proyek yang dihasilkan berdasarkan pekerjaan yang telah selesai sesuai dengan nilai pekerjaan yang direncanakan, proyek dianggap sedang berjalan tepat waktu sesuai jadwal.
- Jika $SV(Rp)(t)$ negatif ($SV(Rp)(t) < 0$): Itu berarti, nilai pekerjaan yang diselesaikan lebih sedikit dari nilai pekerjaan yang direncanakan selama waktu itu. Nilai $SV(Rp)(t)$ positif menunjukkan bahwa pengeluaran biaya proyek yang dihasilkan berdasarkan pekerjaan yang telah selesai melebihi nilai pekerjaan yang direncanakan, proyek dianggap sedang mengalami keterlambatan jadwal.

b. *Schedule Performance Index (SPI(Rp))*

$SPI(Rp)$ adalah metrik yang digunakan untuk mengukur rasio perbandingan antara nilai EV dengan PV. Indeks $SPI(Rp)$ berfungsi untuk memberikan informasi tentang tren kemajuan proyek dari segi kinerja jadwal. Sama seperti $SV(Rp)$ diatas, $SPI(Rp)$ menggunakan data biaya untuk mengukur kinerja jadwal. Maka kinerja jadwal diukur untuk mengetahui, apakah kinerja jadwal proyek berjalan menurun, seimbang, atau meningkat berdasarkan pekerjaan yang direncanakan pada titik waktu tertentu. Pada waktu peninjauan, $SPI(Rp)$ disebut sebagai $SPI(Rp)(t)$. $SPI(Rp)(t)$ dapat diketahui menggunakan rumus berikut (Czarnigowska, 2008; Rojo, 2014):

$$SPI(Rp)(t) = EV_{cum} / PV_{cum}$$

Hasil perhitungan dari $SPI(Rp)(t)$ bisa lebih, kurang, atau sama dengan satu, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika nilai $SPI(Rp)(t)$ lebih besar dari satu ($SPI(Rp)(t) > 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal proyek mengalami peningkatan. $SPI(Rp)(t)$ lebih besar dari satu mengindikasikan adanya efisiensi dalam

pengelolaan waktu, dan proyek dinilai berjalan dengan baik dari segi jadwal.

- Jika nilai $SPI(Rp)(t)$ sama dengan satu ($SPI(Rp)(t) = 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal sebanding dengan yang dihasilkan. $SPI(Rp)(t)$ sama dengan satu mengindikasikan adanya ketepatan dalam penggunaan waktu, proyek dinilai berjalan seimbang sesuai dengan jadwal yang telah direncanakan.
- Jika nilai $SPI(Rp)(t)$ kurang dari satu ($SPI(Rp)(t) < 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal proyek mengalami penurunan. $SPI(Rp)(t)$ kurang dari satu mengindikasikan adanya ketidak-efisienan dalam memanfaatkan waktu, dan proyek dinilai menghadapi masalah dalam manajemen jadwal.

3. Indikator Prediksi Waktu EVM

a. *Estimate Temporary Schedule (ETS)*

ETS adalah metrik yang digunakan untuk menghitung perkiraan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan semua pekerjaan yang tersisa atau untuk memenuhi total rencana waktu yang telah ditetapkan. Nilai ETS diperkirakan dari titik terakhir waktu yang ditinjau berdasarkan perbandingan dari faktor kinerja hingga saat itu, faktor kinerja jadwal adalah SPI. ETS dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$ETS = \text{Sisa Waktu Penyelesaian Proyek sesuai Rencana} / SPI(Rp)$$

b. *Estimate All Schedule (EAS)*

EAS adalah metrik yang digunakan untuk menghitung perkiraan total waktu yang akan dibutuhkan untuk menyelesaikan seluruh aktivitas pekerjaan di akhir proyek. Nilai EAS dihitung dengan menggabungkan nilai jumlah waktu yang sudah digunakan dan nilai ETS yang sudah dihitung sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai EAS dapat melebihi hasil ETS atau melebihi batas rencana proyek, seperti yang sudah diasumsikan sejak awal, coba lihat Gambar 2.2 Grafik Kurva EVM. Hasil nilai EAS berfungsi untuk memberikan informasi tentang bagaimana waktu proyek diproyeksikan akan berakhir,

apakah hasil estimasi waktu di akhir proyek sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan (SAC) atau tidak, lebih sedikit atau lebih banyak. Hal ini akan diketahui pada perhitungan metrik selanjutnya, TVAC. Dengan kata lain, nilai EAS merupakan hasil prediksi waktu penyelesaian proyek yang akan dibandingkan dengan metode-metode lainnya. EAS dapat diketahui dengan rumus berikut:

$$\text{EAS} = \text{Jumlah Waktu yang sudah digunakan} + \text{ETS}$$

c. *Time Variance At Completion (TVAC)*

TVAC adalah metrik yang digunakan untuk menghitung selisih antara nilai SAC dengan nilai prediksi waktu yang sudah dihitung sebelumnya, yaitu EAS. Perbedaan ini akan memperlihatkan gambaran tentang bagaimana waktu proyek diproyeksikan akan berakhir. Dalam TVAC, nilai varian berfungsi untuk memberikan informasi tentang hasil nilai prediksi, apakah waktu yang diproyeksikan untuk menyelesaikan proyek lebih rendah dari total waktu rencana, melebihi total waktu rencana, atau selesai sesuai dengan total waktu rencana yang ditetapkan. Dengan melihat dari jauh prediksi waktu penyelesaian tersebut, manajer proyek dapat mengevaluasi dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk menjaga proyek agar tetap berada pada jalur waktu rencana yang ditetapkan. Rumus untuk menghitung TVAC adalah:

$$\text{TVAC} = \text{SAC} - \text{EAS}$$

Sama dengan varian biaya dan varian jadwal, hasil dari perhitungan TVAC bisa positif, negatif, atau nol, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika TVAC positif ($\text{TVAC} > 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu lebih rendah dari total waktu rencana. Nilai TVAC positif menunjukkan bahwa proyek diperkirakan akan selesai dengan menghabiskan waktu lebih sedikit dari total waktu rencana yang ditetapkan.
- Jika TVAC sama dengan nol ($\text{TVAC} = 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu sama dengan total waktu rencana. Nilai TVAC positif menunjukkan

bahwa proyek diperkirakan akan selesai dengan menghabiskan waktu sesuai dengan total waktu rencana yang ditetapkan.

- Jika TVAC negatif ($TVAC > 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu lebih tinggi dari total waktu rencana. Nilai TVAC negatif menunjukkan bahwa proyek diperkirakan akan selesai dengan menghabiskan waktu lebih banyak dari total waktu rencana yang ditetapkan.

4. Ringkasan Metrik EVM

Tabel 2.1 Metrik EVM

Tahapan	Rumus	Penjelasan
Input	BAC	Nilai kontrak proyek
Data	SAC	Total waktu rencana sesuai kontrak
EVM	Bobot Rencana (%)	Bobot rencana mingguan
(Waktu)	Bobot Realisasi (%)	Bobot realisasi mingguan
	$PV(t) = \text{Bobot Rencana}(\%) (t) / 100 * BAC$	PV digunakan sebagai <i>baseline</i> proyek.
Indikator	$PV_{cum} = \text{Kumulatif Bobot Rencana}(\%) (t) / 100 * BAC$	
Dasar		
EVM	$EV(t) = \text{Bobot Realisasi}(\%) (t) / 100 * BAC$	Nilai pekerjaan yang diselesaikan
(Waktu)	$EV_{cum} = \text{Kumulatif Bobot Realisasi}(\%) (t) / 100 * BAC$	
	$SV(Rp) (t) = EV_{cum} - PV_{cum}$	SV = (+) : Lebih cepat dari jadwal SV = (-): Terlambat dari jadwal SV = (0): Tepat waktu sesuai jadwal
Indikator		
Kinerja		
Waktu	$SPI(Rp) (t) = EV_{cum} / PV_{cum}$	SPI > 1: Peningkatan kinerja jadwal SPI = 1: Kinerja jadwal seimbang SPI < 1: Penurunan kinerja jadwal
EVM		
	$ETS = (SAC - PV_{cum}) / SPI(Rp)$	Waktu yang dibutuhkan untuk memenuhi SAC
Indikator		
Prediksi	$EAS = AC_{cum} + ETS$	EAS < SAC: Waktu lebih sedikit EAS = SAC: Sesuai dengan rencana EAS > SAC: Penambahan waktu
Waktu		
EVM	$TVAC = SAC - EAS$	TVAC = (+): Waktu lebih sedikit TVAC = (0): Waktu sesuai total rencana CVAC = (-): Waktu lebih banyak

5. Kritik Terhadap EVM

Meskipun EVM memiliki banyak pencapaian yang sangat signifikan dalam menyatakan dan menganalisis kinerja biaya proyek secara kuantitatif, keberhasilan ini tidak mencakup kinerja jadwal/ waktu. Alasan kurangnya keberhasilan jadwal yang sesuai meliputi (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006; Henderson, 2007; Adistana dkk., 2018):

1. Indikator kinerja jadwal EVM dilaporkan dalam satuan biaya, bukan waktu. Persamaan CV dan CPI dapat menjadi indikator biaya dengan baik, namun tidak dengan Persamaan SV dan SPI yang tidak cukup jelas dalam mendeskripsikan status jadwal dan oleh karena itu sering menjadi sumber salah tafsir. Meskipun indikator kinerja jadwal tersedia, indikator tersebut tidak dapat diandalkan seperti indikator kinerja biaya.
2. Karena indikator kinerja jadwal EVM dinyatakan dalam satuan biaya, perbandingan dengan indikator jadwal jaringan berdasarkan waktu (misalnya jaringan kritis (CP, *Critical Path*) yang dihitung tanggal akhir) sangat sulit. Sebagai contoh, apabila terjadi sebuah skenario dimana pada akhir periode laporan ditemukan bahwa beberapa aktivitas non-kritis mendahului dari progress rencana, sedangkan beberapa aktivitas kritis mengalami keterlambatan, kondisi ini dapat menghasilkan nilai SPI = 1, apabila hanya melihat nilai SPI yang dihasilkan maka seolah-olah proyek sesuai dengan jadwal perencanaan, padahal kondisi sebenarnya dapat sama sekali berbeda.
3. Masalah yang jauh lebih serius dimana indikator kinerja jadwal EVM selalu kembali ke kesatuan pada saat penyelesaian proyek. EV selalu sama dengan PV terakhir, BAC. Oleh karena itu SV selalu kembali ke nol yang menunjukkan kinerja tepat waktu bahkan jika proyeknya terlambat dan SPI selalu kembali ke satu menjelang akhir proyek yang menunjukkan efisiensi jadwal 100% bahkan dalam proyek ini sudah terlambat.

F. *Earned Schedule Management (ESM)*

Untuk mengatasi anomali nilai indikator kinerja jadwal EVM, melalui artikel yang berjudul “*Schedule is Different*”, Lipke (2003) memperkenalkan konsep *Earned Schedule (ES)* untuk menyelesaikan masalah pada indikator kinerja jadwal EVM: SV dan SPI. *Earned Schedule (ES)* adalah titik waktu ketika nilai EV saat ini harus dicapai, ini adalah titik dimana PV seharusnya sama dengan EV saat ini. Dengan menentukan waktu ini, $ES(t)$, indikator kinerja berbasis waktu dapat dibentuk untuk memberikan informasi tentang varians jadwal dan kinerja jadwal (Lipke & Henderson, 2006).

Pada Gambar 2.3, terdapat contoh perhitungan $ES(t)$ yang mengilustrasikan bagaimana cara memperoleh nilai ES. Proyeksi EV kumulatif ke kurva PV (*baseline* atau PMB), seperti yang ditunjukkan oleh diagram, akan menentukan dimana nilai yang direncanakan (PV) sama dengan EV yang diperoleh. Titik perpotongan ini menandakan momen ketika jumlah EV selaras dengan rencana jadwal (PV). Garis vertikal yang menunjukkan titik waktu peninjauan hingga titik $ES(t)$ menentukan bagian “hasil yang diperoleh” dari jadwal. Titik awal proyek hingga titik $ES(t)$ adalah jumlah *Earned Schedule (ES)* (Lipke & Henderson, 2006).

Dengan ditentukannya ES maka dapat dibentuk indikator kinerja berbasis waktu. “Waktu Aktual” diinisialkan dengan AT (*Actual Time*), adalah durasi pencatatan EV yang diperoleh. Indikator kinerja berbasis waktu dirumuskan dari dua ukuran yaitu ES dan AT. Varians Jadwal menjadi $SV(T) = ES - AT$, dan Indeks Kinerja Jadwal menjadi $SPI(T) = ES / AT$. Akhiran (T) digunakan untuk menunjukkan berdasarkan waktu.

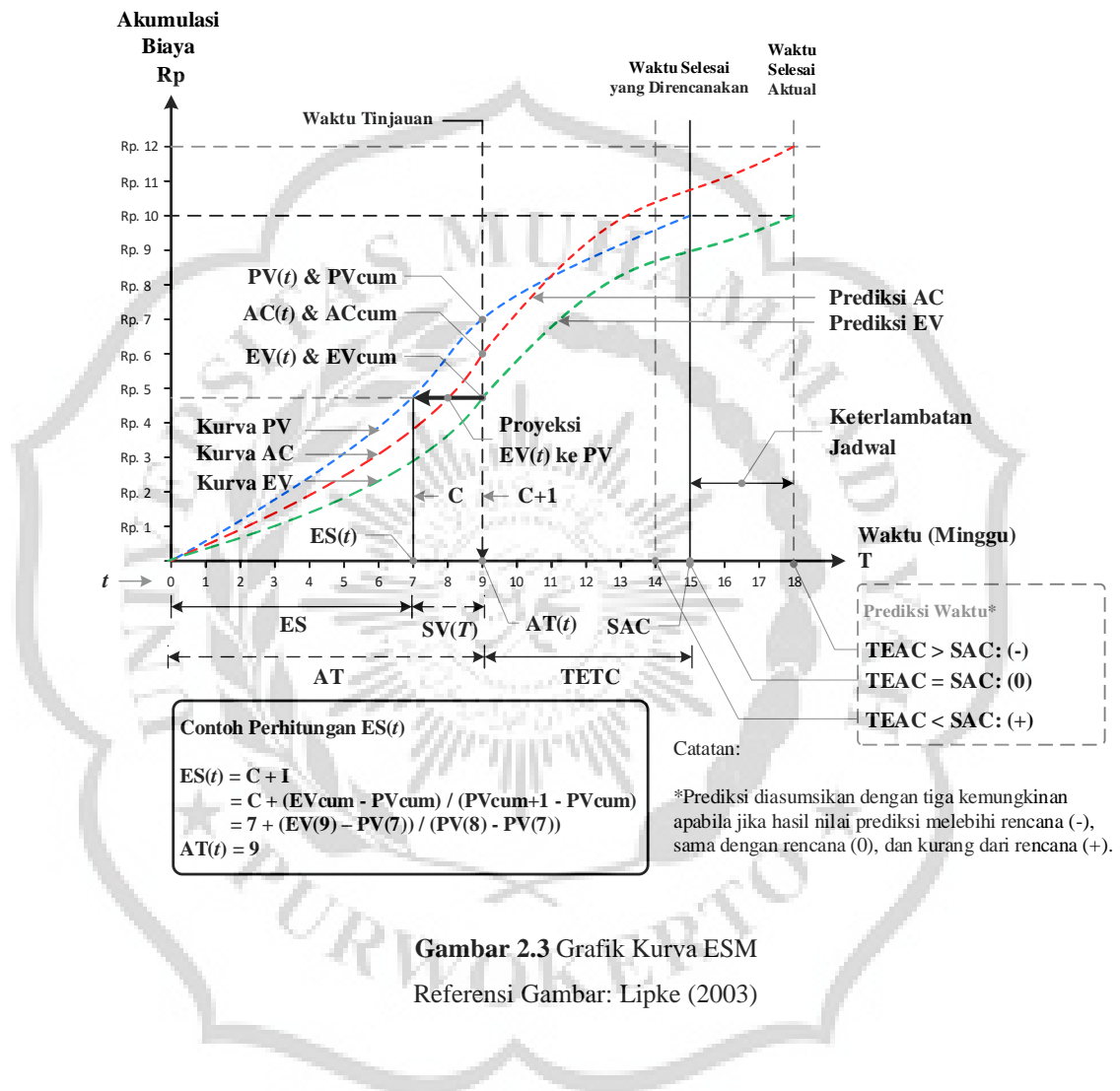
Meskipun ES dapat ditentukan secara grafis seperti dijelaskan sebelumnya, konsep ini menjadi lebih berguna bila difasilitasi dengan contoh perhitungan. Perhitungan waktu disini menggunakan periode waktu minggu, berbeda dengan artikel (Lipke & Henderson, 2006) yang menggunakan periode waktu bulan, dikarenakan penelitian ini akan menggunakan periode waktu

minggu. Terlihat dari gambar, seluruh PV hingga minggu ke-6 telah diperoleh. Namun, hanya sebagian dari minggu ke-7 yang telah diselesaikan sehubungan dengan *baseline*. Dengan demikian durasi bagian penyelesaian dari jadwal yang direncanakan adalah lebih dari 6 minggu. EV yang diperoleh muncul pada akhir minggu ke-9, sehingga waktu aktualnya sama dengan 9 minggu. Cara perhitungan untuk menentukan porsi minggu ke-7 untuk dikreditkan ke ES adalah dengan interpolasi linier. Jumlah EV yang melampaui PV kumulatif minggu ke-6 dibagi dengan jumlah tambahan PV yang direncanakan untuk minggu ke-7 menentukan bagian dari jadwal minggu ke-7 yang telah diperoleh.

Selain memperbaiki indikator kinerja, ESM juga memberikan indikator prediksi yang disebut sebagai TEAC (*Time Estimate At Completion*). TEAC menggantikan SPI(R_p) yang dimiliki oleh EAC metode EVM dengan indeks kinerja jadwal berbasis waktu SPI(T). TEAC dalam penelitian ini akan diidentifikasi dengan SPI(T) tersebut sebagai PF (*Performance Factor*). Seiring dengan berkembangnya penerapan ESM, terminologi yang berbeda banyak bermunculan. Dari sini diperlukan seperangkat terminologi yang sama. Para pelaku yang terlibat menyetujui hal ini bahwa istilah-istilah tersebut harus sejajar, namun mudah dibedakan dari istilah-istilah EVM (Lipke & Henderson, 2006). Seperti yang terlihat pada Tabel 2.5, terminologi *Earned Schedule Management* (ESM) yang digunakan pada penelitian ini, istilah yang dipilih sebanding dengan istilah-istilah atau terminologi dari EVM. Dalam kebanyakan kasus, istilah ESM hanyalah istilah yang analog dengan EVM, yang ditambahkan dengan akhiran “ T ” (*Time*) (Lipke & Henderson, 2006). Untuk memahami hubungan dan keterkaitan antar metrik dari indikator ESM, akan disajikan Grafik Kurva ESM yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan penjelasan mengenai masing-masing metrik pada setiap indikator akan dipaparkan pada bagian selanjutnya.

Dalam metode ESM, beberapa data dari hasil perhitungan EVM masih digunakan sebagai input data perhitungan ESM, data-data tersebut meliputi: waktu aktual pada waktu tertentu ($AT(t)$), total waktu yang direncanakan

(SAC), nilai EV pada waktu tertentu ($EV(t)$) dan nilai PV pada waktu tertentu ($PV(t)$). Disini menunjukkan bahwa metode EVM masih diperlukan untuk mendukung metode ESM.



Gambar 2.3 Grafik Kurva ESM
Referensi Gambar: Lipke (2003)

1. Indikator Dasar ESM

Berikut merupakan beberapa metrik yang digunakan sebagai indikator dasar untuk melakukan analisis kinerja menggunakan metode ESM:

a. *Earned Schedule (ES)*

ES adalah metrik kunci dalam metode ESM, metrik ini digunakan untuk menghitung waktu dan mengetahui kapan nilai $EV(t)$ seharusnya diperoleh sesuai rencana pada titik waktu tertentu. Pada periode waktu yang ditinjau, ES disebut sebagai $ES(t)$. Nilai ini memperluas konsep EV ke aspek waktu. Terdapat dua parameter utama yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai ES, kedua parameter tersebut yakni C dan I (Lipke, 2003). Rumus untuk menghitung nilai ES adalah sebagai berikut:

$$ES(t) = C + I$$

dimana,

- C & C+1 (*Current*) adalah banyaknya periode pada kedua sisi perpotongan kurva PV. Variabel C+1 adalah nilai dimana EV melebihi PV, sedangkan C adalah nilai dimana EV sama dengan PV.
- I (*Increments*) adalah nilai yang menunjukkan kapan nilai EV seharusnya diperoleh sesuai rencana pada titik waktu tertentu. Untuk mendapatkan nilai I dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$I = (EV_{cum} - PV_{cum}) / (PV_{cum+1} - PV_{cum})$$

dimana,

- Nilai EV_{cum} yang diperoleh pada waktu peninjauan digunakan sebagai titik awal untuk memproyeksikan nilai ES atau menuju garis lurus yang mengarah ke nilai PV_{cum} .
- PV_{cum+1} adalah nilai PV yang searah dengan nilai EV_{cum} . Nilai PV_{cum+1} sering disebut sebagai nilai atas. Dengan kata lain, nilai ini ada pada periode waktu yang sama atau segaris dengan titik dimana nilai $ES(t)$ terjadi.

- PVcum disini adalah nilai bawah atau satu periode waktu sebelumnya dari nilai PVcum+1.

2. Indikator Kinerja ESM

Berikut merupakan beberapa metrik yang digunakan sebagai indikator kinerja metode ESM untuk menilai kinerja waktu proyek:

a. *Schedule Variance (SV(T))*

$SV(T)$ adalah metrik yang digunakan untuk menghitung selisih antara nilai $ES(t)$ dengan $AT(t)$. Berbeda dengan SV dari EVM, SV disini dinyatakan dalam satuan waktu, maka dari itu akhiran berubah menjadi $SV(T)$. Selisih tersebut akan diukur pada periode waktu yang ditinjau, pada saat itu $SV(T)$ disebut sebagai $SV(T)(t)$. Dalam $SV(T)$, nilai varian berfungsi untuk memberikan informasi tentang status kemajuan proyek dari segi jadwal, apakah waktu aktual yang dihabiskan pada periode waktu itu kurang, sesuai, atau melebihi waktu yang seharusnya diperoleh. Rumus untuk menghitung $SV(T)(t)$ adalah (Czarnigowska, 2008; Rojo, 2014):

$$SV(T)(t) = ES(t) - AT(t)$$

Hasil dari perhitungan $SV(T)(t)$ bisa positif, negatif, atau nol, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika $SV(T)(t)$ positif ($SV(T)(t) > 0$): Itu berarti, waktu yang diperoleh berdasarkan pekerjaan yang diselesaikan lebih banyak dari waktu aktual yang dihabiskan selama periode waktu itu, proyek dianggap sedang berjalan lebih cepat dari jadwal.
- Jika $SV(T)(t)$ sama dengan nol ($SV(T)(t) = 0$): Itu berarti, waktu yang diperoleh berdasarkan pekerjaan yang diselesaikan sama dengan waktu aktual yang dihabiskan selama periode waktu itu, proyek dianggap sedang berjalan tepat waktu sesuai jadwal.
- Jika $SV(T)(t)$ negatif ($SV(T)(t) < 0$): Itu berarti, waktu yang diperoleh berdasarkan pekerjaan yang diselesaikan lebih sedikit dari waktu aktual

yang dihabiskan selama periode waktu itu, proyek dianggap sedang mengalami keterlambatan jadwal.

b. *Schedule Performance Index (SPI(T))*

$SPI(T)$ adalah metrik yang digunakan untuk mengukur rasio perbandingan antara nilai $ES(t)$ dengan $AT(t)$. Indeks $SPI(T)$ berfungsi untuk memberikan informasi tentang tren kemajuan proyek dari segi kinerja jadwal, apakah kinerja jadwal proyek berjalan menurun, seimbang, atau meningkat berdasarkan pekerjaan yang telah diselesaikan pada titik waktu tertentu. Pada waktu peninjauan, $SPI(T)$ disebut sebagai $SPI(T) (t)$. $SPI(T) (t)$ dapat diketahui menggunakan rumus berikut (Czarnigowska, 2008; Rojo, 2014):

$$SPI(T) (t) = ES(t) / AT(t)$$

Hasil perhitungan dari $SPI(T)$ bisa lebih, kurang, atau sama dengan satu, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika nilai $SPI(T) (t)$ lebih besar dari satu ($SPI(T) (t) > 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal proyek mengalami peningkatan. Nilai $SPI(T) (t)$ lebih besar dari satu mengindikasikan bahwa penggunaan waktu lebih efektif, dan proyek dinilai berjalan dengan baik dari segi jadwal.
- Jika nilai $SPI(T) (t)$ sama dengan satu ($SPI(T) (t) = 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal sebanding dengan yang dihasilkan. Nilai $SPI(T) (t)$ sama dengan satu mengindikasikan adanya ketepatan dalam penggunaan waktu, proyek dinilai berjalan seimbang dari segi jadwal.
- Jika nilai $SPI(T) (t)$ kurang dari satu ($SPI(T) (t) < 1$): Ini menunjukkan bahwa kinerja jadwal proyek mengalami penurunan. Nilai $SPI(T) (t)$ kurang dari satu mengindikasikan bahwa penggunaan waktu tidak efektif, dan proyek dinilai menghadapi masalah dalam manajemen jadwal.

3. Indikator Prediksi ESM

Berikut merupakan beberapa metrik yang digunakan sebagai indikator prediksi metode ESM untuk menghitung waktu penyelesaian proyek:

a. *Time Estimate To Complete (TETC)*

TETC adalah metrik yang digunakan untuk menghitung perkiraan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan semua pekerjaan yang tersisa atau untuk memenuhi total waktu yang direncanakan. Nilai TETC diperkirakan dari titik terakhir waktu yang ditinjau berdasarkan pembandingan dari faktor kinerja saat itu. Faktor kinerja waktu yang digunakan adalah $SPI(T)$. TETC dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Vandevorde & Vanhoucke, 2006):

$$TETC = (SAC - ES(t)) / SPI(T)$$

b. *Time Estimate At Completion (TEAC)*

TEAC adalah metrik yang digunakan untuk menghitung perkiraan total waktu yang akan dihabiskan di akhir proyek. Nilai TEAC dihitung dengan menggabungkan nilai durasi aktual dengan nilai TETC yang sudah dihitung sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai TEAC dapat melebihi hasil TETC atau melebihi batas rencana proyek, seperti yang sudah diasumsikan sejak awal, coba lihat Gambar 2.3 Grafik Kurva ESM. Hasil nilai TEAC juga dapat memberikan gambaran tentang bagaimana waktu proyek diproyeksikan akan berakhir, apakah hasil estimasi waktu di akhir proyek sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan (SAC) atau tidak, lebih cepat atau lebih lambat. Hal ini akan diketahui pada perhitungan metrik selanjutnya, TVAC. Dengan kata lain, nilai TEAC merupakan hasil prediksi waktu penyelesaian proyek yang akan dibandingkan dengan metode-metode lainnya. TEAC dapat diketahui dengan rumus berikut (Vandevorde & Vanhoucke, 2006):

$$TEAC = AT(t) + TETC$$

dimana,

- $AT(t)$ adalah waktu aktual yang telah dihabiskan hingga titik terakhir waktu peninjauan.
- TETC adalah estimasi waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan semua pekerjaan yang tersisa atau untuk memenuhi nilai SAC.

c. *Time Variance At Completion (TVAC)*

TVAC adalah metrik yang digunakan untuk menghitung selisih antara nilai SAC dengan nilai prediksi waktu yang sudah dihitung sebelumnya, yaitu TEAC. Perbedaan ini akan memperlihatkan gambaran tentang bagaimana waktu proyek diproyeksikan akan berakhir. Dalam TVAC, nilai varian berfungsi untuk memberikan informasi tentang hasil nilai prediksi, apakah waktu yang diproyeksikan untuk menyelesaikan proyek lebih sedikit, lebih banyak, atau selesai sesuai dengan total waktu yang direncanakan. Dengan melihat dari jauh prediksi waktu penyelesaian tersebut, manajer proyek dapat mengevaluasi dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk menjaga proyek agar tetap berada pada jalur waktu yang ditetapkan. Rumus untuk menghitung TVAC adalah (Generalisasi dari Rojo, 2014):

$$TVAC = SAC - TEAC$$

Sama dengan varian jadwal, hasil dari perhitungan TVAC bisa positif, negatif, atau nol, dan setiap nilai tersebut memiliki interpretasi yang berbeda:

- Jika TVAC positif ($TVAC > 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu lebih sedikit dari total waktu yang direncanakan. Nilai TVAC positif menunjukkan bahwa proyek diperkirakan akan selesai dengan jadwal yang lebih cepat dari total waktu yang direncanakan. Ini mengindikasikan adanya percepatan dalam penyelesaian proyek.
- Jika TVAC sama dengan nol ($TVAC = 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu sama dengan total waktu yang direncanakan. Nilai TVAC positif menunjukkan bahwa proyek diperkirakan akan selesai sesuai dengan total waktu yang direncanakan.
- Jika TVAC negatif ($TVAC < 0$): Itu berarti, nilai prediksi waktu lebih banyak dari total waktu yang direncanakan. Nilai TVAC negatif menunjukkan bahwa proyek diperkirakan akan selesai lebih lama dari total waktu yang direncanakan. Ini mengindikasikan adanya keterlambatan dalam penyelesaian proyek.

4. Ringkasan Metrik ESM

Berikut merupakan tabel ringkasan dari beberapa metrik yang digunakan dalam metode ESM yang sudah dijelaskan sebelumnya diatas:

Tabel 2.2 Metrik ESM

Tahapan	Rumus	Penjelasan
Input Data ESM	$AT(t)$	Jumlah waktu aktual yang dihabiskan hingga waktu peninjauan
	SAC	Total waktu rencana yang ditetapkan
	EV_{cum}	Diperoleh pada perhitungan EVM.
	PV_{cum+1}	
Indikator Dasar ESM	$ES(t) = C + I$	Jumlah nilai ES yang diperoleh.
	C	
	$I = (EV_{cum} - PV_{cum}) / (PV_{cum+1} - PV_{cum})$	
Indikator Kinerja ESM	$SV(T) = ES(t) - AT(t)$	SV = (+): Lebih cepat dari jadwal
	$SV(T) (\%) = SV(T) / SAC$	SV = (0): Tepat waktu sesuai jadwal
	$SPI(T) = ES(t) / AT(t)$	SV = (-): Terlambat dari jadwal SPI > 1: Peningkatan kinerja jadwal SPI = 1: Kinerja jadwal seimbang SPI < 1: Penurunan kinerja jadwal
Indikator Prediksi ESM	$TETC = (SAC - ES(t)) / SPI(T)$	Waktu yang dibutuhkan untuk memenuhi SAC
	$TEAC = AT(t) + TETC$	TEAC < SAC: Waktu lebih sedikit
	$TVAC = SAC - TEAC$	TEAC = SAC: Sesuai dengan rencana
	$TVAC (\%) = TVAC / SAC$	TEAC > SAC: Mengalami keterlambatan
		TVAC = (+): Proyek diprediksikan akan selesai lebih cepat
		TVAC = (0): Proyek diprediksikan akan selesai sesuai total waktu yang direncanakan
		TVAC = (-): Proyek diprediksikan akan selesai lebih lama

G. Kalman Filter Earned Value Method (KEVM)

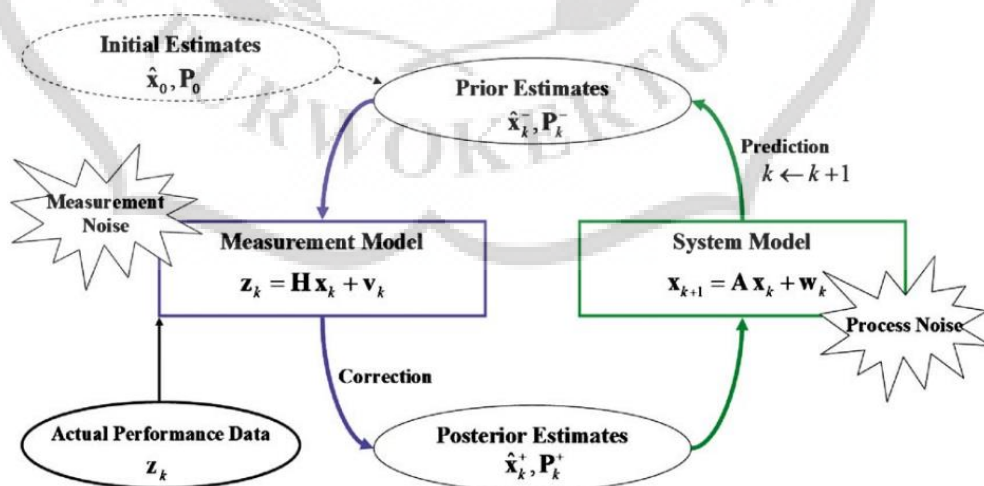
Ketika memprediksi durasi akhir proyek dengan menggunakan metode deterministik, hasil prediksi hanya berupa satu nilai yang pasti. Sedangkan untuk dapat melakukan prediksi secara probabilistik diperlukan banyak kemungkinan nilai estimasi durasi. Oleh karena itu, prediksi durasi yang telah dihitung dengan menggunakan ESM akan dilanjutkan dengan menggunakan *kalman filter*. Metode *forecasting* yang dikembangkan berdasarkan *kalman filter* oleh (Kim (2007); Kim & Reinschmidt (2009); Kim & Reinschmidt (2010); Kim (2014); Kim & Kim (2014)) yaitu *Kalman Filter Earned Value Method* (KEVM). KEVM digunakan untuk memprediksi kemajuan proyek dan distribusi probabilitas pada durasi proyek saat selesai.

Menurut Kim & Reinschmidt (2010), fitur utama KEVM yang berbeda dengan ESM dan metode *forecasting* berbasis EVM lainnya adalah bahwa KEVM memberikan prediksi probabilistik durasi proyek pada saat penyelesaian dengan cara yang adaptif sehingga dapat digunakan sejak awal proyek tanpa kehilangan akurasi yang signifikan. KEVM adalah metode rekursif yang merevisi distribusi durasi proyek sebelumnya dengan menggabungkan prediksi satu langkah ke depan yang dibuat oleh *model sistem* dan pengamatan baru dari *model pengukuran* dengan meminimalkan varians dari *estimasi posterior*. Dengan adanya batas prediksi, titik peringatan dini dapat ditentukan dengan cara yang obyektif (B.-C. Kim, 2007).

Keluaran probabilistik dari KFFM divisualisasikan dengan tiga bagan berikut: Grafik Probabilitas Keberhasilan, Profil EDAC Probabilistik, dan Profil Probabilitas Keberhasilan. Digunakan secara terpisah atau dalam kombinasi, bagan-bagan ini dapat berfungsi sebagai dasbor manajemen proyek untuk pemantauan risiko jadwal. Dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel*, KEVM dapat digunakan bersama dengan sistem pelaporan kinerja berbasis EVM (atau sistem pelaporan kinerja berbasis kurva-S lainnya) tanpa beban tambahan pengumpulan data (Kim & Reinschmidt, 2010).

1. Filter Kalman

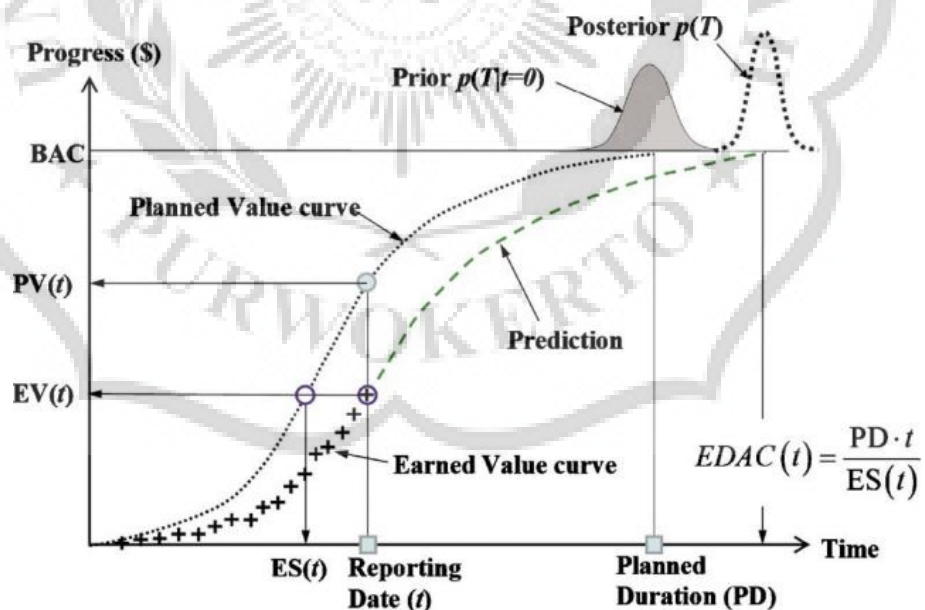
Filter Kalman merupakan suatu algoritma yang terdiri dari sekumpulan persamaan matematika yang menerapkan perhitungan komputasi secara rekursif dalam mengestimasi perubahan *state* karena gangguan *noise* pada sistem, dan dianggap mampu menghasilkan estimasi *state* yang lebih akurat dalam melakukan prediksi suatu data daripada data yang hanya diperoleh melalui pengukuran tunggal saja, hal ini terjadi karena filter yang dibuat mampu meminimalkan nilai *error*. Dalam prosesnya, algoritma filter kalman terbagi menjadi dua tahapan yaitu tahap prediksi (*time update*) dan tahap koreksi (*measurement update*). Tahap prediksi dilakukan untuk mendapatkan informasi saat ini dengan memasukkan informasi pada periode sebelumnya, pembaruan waktu (*time update*) yang dilakukan bertugas untuk membuat prediksi nilai *state*. Sedangkan di tahap koreksi, informasi yang diperoleh pada tahap prediksi akan dikoreksi sehingga dapat memperbaiki informasi yang ada dan memperoleh hasil yang lebih akurat, pembaruan pengukuran (*measurement update*) yang dilakukan akan menyesuaikan nilai prediksi dengan nilai ukur aktual untuk mendapatkan nilai prediksi yang sudah dikoreksi. Dua tahap ini akan dilakukan secara rekursif dan saling berhubungan satu sama lain, siklus ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Siklus Kerja Rekursif dari Filter Kalman.

Sumber Gambar: Kim & Reinschmidt (2010)

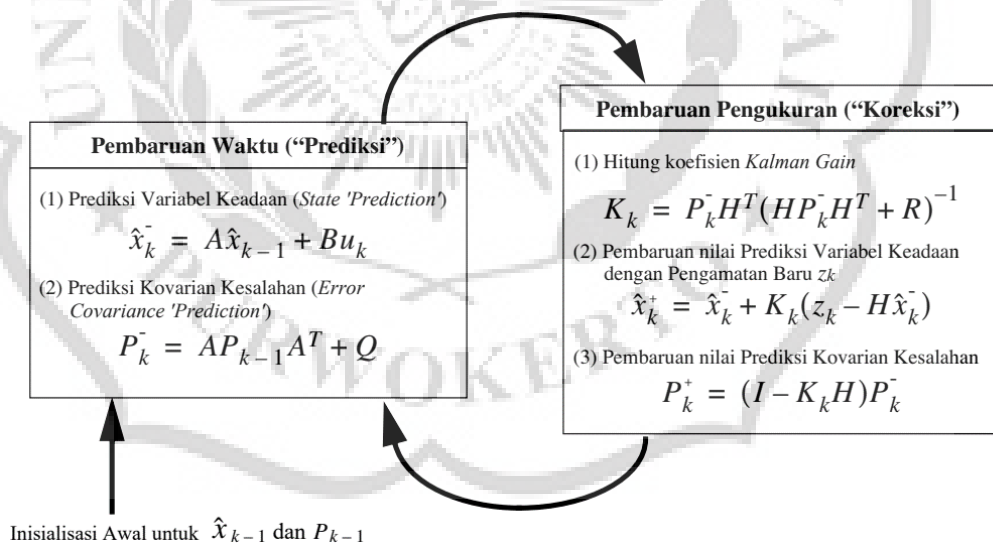
Dalam kerangka filter Kalman, terdapat dua *state*, yakni *state prior* dan *state posterior*. *Prior Estimates* mengacu pada perkiraan awal tentang keadaan sistem sebelum diperbarui dengan pengamatan terbaru. *State Prior* adalah distribusi probabilitas yang menggambarkan apa yang kita ketahui tentang keadaan sistem sebelum memperhitungkan pengamatan baru. *Prior* pada waktu $t-1$ dianggap sebagai dasar untuk pembaruan ke waktu k selanjutnya. Dalam notasi Bayesian, *prior* adalah distribusi probabilitas atas variabel keadaan pada waktu sebelumnya. Sedangkan *Posterior Estimates* merupakan perkiraan yang diperbarui setelah mempertimbangkan pengamatan terbaru. *State Posterior* adalah distribusi probabilitas yang menggambarkan keadaan sistem setelah memperhitungkan pengamatan baru. *Posterior* pada waktu k dihitung berdasarkan *prior* pada waktu $t-1$ dan pengamatan pada waktu k . Dalam filter Kalman, *posterior* adalah distribusi probabilitas atas variabel keadaan pada waktu k . Untuk mempermudah apa yang dimaksud dengan *State Prior* dan *State Posterior* dan melihat gambaran dari posisi kedua *state* tersebut, dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2.5 *State Prior* dan *State Posterior* Filter Kalman

Sumber Gambar: Kim & Reinschmidt (2010)

Tiap *state* diwakili pada waktu k oleh dua set variabel: Variabel Keadaan (*State Variable* (X_k)) dan Variabel Kovarian Kesalahan (*Error Covariances* (P_k)). Variabel Keadaan menggambarkan model keadaan saat ini yang masih dinamis. X_k adalah matriks variabel keadaan pada waktu k . Kovarian Kesalahan mewakili ketidakpastian dalam estimasi variabel keadaan. P_k adalah matriks kovarian kesalahan pada waktu k . Keadaan dan Kovarian diperbarui pada setiap interval waktu k melalui dua model linear stokastik: Model Sistem (*System Model*) pada tahap prediksi dan Model Pengukuran (*Measurement Model*) pada tahap koreksi. Model Sistem memprediksi keadaan sistem di masa depan pada langkah waktu berikutnya dan Model Pengukuran memperbarui informasi sebelumnya menggunakan Pengamatan Baru, Z_k . Perlu dicatat bahwa siklus rekursif dari filter Kalman harus dipicu dengan Inisialisasi Awal pada waktu $k = 0$ dari Keadaan (x_0) dan Kovarian terkait (P_0). Untuk melihat bagaimana kerangka tersebut bekerja, dapat dilihat pada Gambar 2.6 Skema Pengoperasian Filter Kalman.



Gambar 2.6 Skema Pengoperasian Filter Kalman

Sumber Gambar: Welch & Bishop (2001)

2. Input Data dan Metrik KEVM

Dalam melakukan perhitungan dengan menggunakan metode Filter Kalman, penelitian ini akan menggunakan perhitungan yang telah diprogram oleh Vaudrey (2008) untuk memudahkan perhitungan. Cara ini juga digunakan oleh beberapa penelitian seperti (B.-C. Kim & Kim, 2014; Thianudorus dkk., 2017; Sugiyanto & Gondokusumo, 2020). Pada program ini digunakan asumsi bahwa variabel model adalah konstan karena durasi dianggap sebagai fungsi linier. Dengan begitu, input data KEVM yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari:

- a. SAC (*Schedule At Completion*): Total waktu rencana digunakan sebagai nilai Du_r total.
- b. Waktu Aktual (AT): Nilai durasi akhir dari pengamatan aktual proyek dalam satuan waktu ini akan digunakan sebagai nilai Du_m .
- c. Waktu Tersisa: Sisa waktu dari rencana proyek yang belum terjadi sehingga tidak diketahui kemajuan yang sebenarnya. Sisa waktu digunakan untuk menghitung noise aktual atau ketidakpastian dalam Filter Kalman.
- d. $TEAC_{ESM}$ (*ESM Time Estimate At Completion*): Nilai prediksi waktu ini yang akan diperbarui.

Berikut merupakan beberapa metrik filter kalman yang digunakan pada tahap prediksi dan tahap koreksi yang telah disederhanakan pada metode KEVM dalam penelitian ini (Thianudorus dkk., 2017; Sugiyanto & Gondokusumo, 2020):

a. Tahap Prediksi

- 1) Nilai prediksi sebelum dilakukan penyaringan (X_{bft})

$$X_{bft} = X_{aft-1}$$

dimana,

- X_{aft-1} adalah nilai estimasi durasi setelah dilakukan penyaringan pada satu periode waktu sebelumnya.

- 2) Nilai *error* sebelum dilakukan penyaringan (P_{bft})

$$P_{bft} = Du_{rtotal} + P_{aft-1}$$

dimana,

- Du_{rtotal} adalah total durasi rencana proyek, dalam terminologi ESM ini adalah SAC
- P_{aft-1} adalah nilai *error* setelah dilakukan penyaringan pada satu waktu sebelumnya.

b. Tahap Koreksi

1) Nilai pengukuran estimasi yang mengandung *noise* ($Y(t)$)

$$Y(t) = TEAC_{ESM} + \text{Noise Aktual} \times (0.5 - C)$$

dimana,

- Nilai TEAC yang digunakan disini adalah nilai TEAC yang diperoleh dari metode ESM sebelumnya.
- Sisa waktu digunakan sebagai noise aktual yang merupakan ketidakpastian atau fluktuasi yang terjadi dilapangan selama pelaksanaan proyek. Ini merupakan sisa waktu dari rencana proyek yang belum terjadi sehingga tidak diketahui progress yang sebenarnya.
- C adalah variabel yang bernilai acak antara 0 (nol) hingga 1 (satu) yang merupakan nilai probabilistik. Nilai C dilakukan menggunakan rumus *excel* $RAND()$, rumus tersebut atau nilai C ini yang akan membuat filter kalman dapat menghasilkan nilai prediksi dengan hasil yang beragam seperti sifat probabilistiknya.

2) Nilai *kalman gain* (K)

$$K(t) = P_{bft} / (P_{bft} + Du_m)$$

dimana,

- P_{bft} adalah nilai *error* sebelum dilakukan penyaringan pada waktu yang sedang dihitung.
- Du_m adalah durasi akhir dari pengamatan aktual proyek dalam satuan waktu. Dengan kata lain, ini merupakan nilai Waktu Aktual (AT).

3) Nilai estimasi setelah dilakukan penyaringan (X_{aft})

$$X_{aft} = X_{bft} + K(t) * (Y(t) - X_{bft})$$

dimana,

- X_{bft} adalah nilai estimasi durasi sebelum dilakukan penyaringan pada waktu yang sedang dihitung.
- $K(t)$ adalah nilai *kalman gain* pada waktu yang sedang dihitung.
- $Y(t)$ adalah nilai $EDAC_{EDM}$ yang mengandung ketidakpastian.

4) Nilai *error* setelah dilakukan penyaringan (P_{aft})

$$P_{aft} = (1 - K(t)) \times P_{bft}$$

dimana,

- P_{aft} adalah nilai *error* setelah dilakukan penyaringan pada waktu yang sedang dihitung.
- $K(t)$ adalah nilai *kalman gain* pada waktu yang sedang dihitung.
- P_{bft} adalah nilai *error* sebelum dilakukan penyaringan pada waktu yang sedang dihitung.

H. Kriteria Pengukuran Prediksi

Penelitian yang mengusulkan metode *forecasting* baru sering kali berupaya meningkatkan tiga aspek prediksi: akurasi, ketepatan, dan stabilitas. Bagian ini membahas arti masing-masing aspek tersebut.

1. Akurasi

Akurasi merupakan faktor yang diperhatikan dalam pemilihan metode *forecasting*, terutama pada proyek konstruksi dimana perkiraan yang tidak akurat akan berdampak besar terhadap kinerja suatu proyek. Pengukuran akurasi biasa dilakukan dengan mencari nilai kesalahan (*error*). Semakin kecil nilai *error* maka semakin akurat sebuah metode dalam melakukan prediksi. Nilai kesalahan (*error*) merupakan selisih atau perbedaan antara nilai aktual dengan nilai prediksi. Ada sejumlah ukuran akurasi yang umum digunakan untuk mencari nilai *error*, diantaranya: *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) (Ead, 2020). Tabel 2.3 menunjukkan rumus yang digunakan untuk setiap ukuran akurasi.

Tabel 2.3 Analisis Pengukuran Kesalahan

Error	Rumus
<i>Mean Absolute Error</i> (MAE)	$MAE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n a_t - f_t $
<i>Mean Absolute Percentage Error</i> (MAPE)	$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left \frac{(a_t - f_t)}{a_t} \right $

dimana,

n = jumlah periode waktu proyek.

a = nilai aktual t untuk setiap periode prediksi yang ditinjau.

f = nilai prediksi t untuk setiap periode prediksi yang ditinjau.

a. Mean Absolute Error (MAE)

MAE adalah bentuk metrik pengukuran nilai *error* paling sederhana yang sering digunakan. MAE mengukur rata-rata dari nilai *error* secara mutlak (absolut), yaitu dengan mengambil nilai absolut dari selisih antara nilai prediksi dengan nilai aktual yang dibagi dengan jumlah total periode waktu proyek, tanpa memperhitungkan arah kesalahan. Arah kesalahan merujuk pada apakah kesalahan prediksi cenderung lebih tinggi atau lebih rendah dari nilai aktual.

Karena sifat MAE yang mudah dipahami dan menghasilkan nilai absolut sehingga tidak bergantung pada nilai prediksi yang rendah atau tinggi. Nilai terlalu rendah terjadi ketika prediksi memberikan angka yang lebih kecil dari nilai aktual yang seharusnya terjadi. Sedangkan nilai terlalu tinggi terjadi ketika prediksi memberikan angka yang lebih besar dari nilai aktual yang seharusnya terjadi. Namun, MAE tidak memperhitungkan bobot pada kesalahan prediksi yang besar atau kecil, sehingga prediksi yang jauh dari nilai sebenarnya dan prediksi yang dekat dengan nilai sebenarnya dianggap sama pentingnya.

Dengan memperlakukan kesalahan positif dan negatif dengan cara yang sama, MAE memberikan gambaran yang seimbang tentang kualitas prediksi model. Ini memungkinkan dalam mendapatkan pemahaman yang lengkap tentang seberapa baik atau seberapa buruk model atau metode *forecasting* tersebut. Memperlakukan kesalahan dengan cara yang sama mempermudah interpretasi dan analisis hasil. Hal ini menjadikan MAE lebih mudah dipahami dan diterapkan dalam berbagai situasi. Dengan tidak membedakan antara kesalahan positif dan negatif, MAE menjadi lebih netral atau tidak memihak dalam mengevaluasi kinerja model. Hal ini dapat menghindari bias yang mungkin muncul jika hanya fokus pada satu arah kesalahan. Dalam MAE, setiap kesalahan, baik yang besar maupun yang kecil, akan memberikan kontribusi yang sama terhadap total kesalahan (*error*). Jadi, ketika tiap-tiap *error* meningkat atau berkurang, kontribusinya terhadap total *error* juga akan meningkat atau berkurang secara sebanding.

b. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

MAPE mengukur kesalahan dengan menghitung nilai rata-rata absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Selisih nilai aktual dengan nilai prediksi dibagi dengan nilai aktual, kemudian membaginya dengan nilai observasi pada periode tersebut, lalu nilainya dimutlakan (absolut) untuk menemukan rata-rata persentase absolut. Dengan begitu, artinya MAPE akan selalu bernilai positif. MAPE dianggap sebagai versi MAE tertimbang karena perbedaannya dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Karena MAPE dinyatakan dalam persentase, seringkali lebih mudah diinterpretasikan daripada MAE (Ead, 2020).

Nilai MAPE sebesar 10% dapat diartikan bahwa selisih rata-rata nilai peramalan dengan nilai sebenarnya adalah 10%. Semakin kecil nilai MAPE maka semakin akurat sebuah model dalam melakukan prediksi. Hal ini berarti sebuah model yang memiliki nilai MAPE sebesar 5% merupakan model yang lebih baik dalam melakukan peramalan dibandingkan model lain yang memiliki nilai MAPE sebesar 10%. Interpretasi nilai MAPE dapat dilihat dari interval nilai dibawah ini:

Tabel 2.4 Interpretasi Hasil MAPE

Nilai MAPE	Interpretasi
≤ 10	Hasil peramalan sangat akurat
10 - 20	Hasil peramalan baik
20 - 50	Hasil peramalan layak (cukup baik)
> 50	Hasil peramalan tidak akurat

2. Ketepatan

Seiring berjalannya proyek, keakuratan nilai prediksi diharapkan menyatu menuju nilai aktual pada saat penyelesaian. Model prediksi yang menunjukkan konvergensi lebih cepat, lebih dapat diandalkan karena manajer dapat mendeteksi penyimpangan lebih awal, ketika penyimpangan tersebut dapat dikendalikan dan dampaknya dikurangi. Seiring bertambahnya waktu proyek, kemampuan untuk menerapkan perubahan yang akan mempengaruhi

hasil akhir proyek berkurang, sementara biaya yang terkait dengan perubahan tersebut meningkat (Ead, 2020).

Oleh karena itu, ketika membandingkan keakuratan model, salah satu fitur penting yang harus diidentifikasi adalah kapan akurasi tersebut dicapai. Dengan kata lain, model yang memiliki MAE sebesar 15% ketika proyek telah selesai 30% lebih disukai dibandingkan model yang mencapai MAE yang sama ketika proyek telah selesai 70%. Ketepatan waktu (T) suatu *metode forecasting* dihitung sebagai:

$$T_x = \frac{\text{time of forecast}}{\text{actual project duration}}$$

dimana,

x = tingkat akurasi yang diinginkan (MAE)

3. Stabilitas

Stabilitas metode *forecasting* ditentukan oleh seberapa besar variasi prediksi antara satu periode prediksi dan periode prediksi berikutnya. Jika *forecasting* dilakukan setiap minggu, teknik yang lebih stabil umumnya akan memberikan perkiraan serupa dari minggu ke minggu kecuali terjadi perubahan ekstrim pada proyek. Jika perkiraan sangat berfluktuasi dari minggu ke minggu, manajer proyek akan kesulitan menarik kesimpulan atau mengambil keputusan berdasarkan perkiraan tersebut. Oleh karena itu, semakin stabil suatu metode *forecasting*, semakin dapat diandalkan metode tersebut. Stabilitas metode *forecasting* dapat diukur dengan menggunakan koefisien variasi (CV, *Coefficient of Variation*), yang juga dikenal sebagai deviasi standar relatif. Ini adalah ukuran standar penyebaran kumpulan data di sekitar rata-ratanya. Semakin rendah CV, semakin besar stabilitas *forecasting* (Ead, 2020).

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n}}}{\bar{f}}$$

dimana,

f_i = nilai prediksi pada periode tinjauan,

\bar{f} = rata-rata nilai prediksi, dan

n = jumlah periode prediksi untuk setiap proyek.

Penting untuk membedakan antara stabilitas *forecasting* dan keakuratan *forecasting*. Stabilitas *forecasting* adalah tentang membandingkan nilai prediksi dengan nilai prediksi berikutnya, sedangkan akurasi *forecasting* adalah tentang membandingkan nilai prediksi dengan nilai aktual. Suatu metode *forecasting* mungkin mempunyai koefisien variabilitas yang rendah yang menunjukkan bahwa kestabilan prediksinya tinggi, namun masih mempunyai keakuratan *forecasting* yang rendah jika \bar{f} jauh dari nilai sebenarnya. Di sisi lain, metode yang kurang stabil diperkirakan akan memiliki akurasi yang rendah karena rata-rata prakiraan akan semakin jauh dari nilai sebenarnya (Ead, 2020).

