

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Industri Kontruksi

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor strategis yang berperan penting dalam menyediakan sarana dan prasarana penunjang kehidupan masyarakat. Industri ini mencakup seluruh kegiatan yang berkaitan dengan pembangunan, pemeliharaan, dan pembongkaran infrastruktur, yang secara umum berada dalam lingkup teknik sipil dan arsitektur. Produk yang dihasilkan mencakup berbagai jenis bangunan, seperti rumah tinggal, gedung perkantoran, fasilitas umum, bangunan air (bendungan, saluran irigasi, dan pembangkit listrik tenaga air), hingga bangunan industri.

Dalam konteks industri konstruksi, penerapan manajemen proyek memiliki peranan yang sangat penting karena proyek konstruksi umumnya bersifat kompleks, melibatkan berbagai disiplin ilmu, serta dipengaruhi oleh sejumlah faktor eksternal seperti kondisi cuaca, kebijakan pemerintah, dan situasi ekonomi. Keberhasilan suatu proyek konstruksi sangat bergantung pada kemampuan manajer proyek dalam mengelola dan menyeimbangkan tiga elemen utama proyek, yaitu waktu, biaya, dan mutu, yang dikenal dengan istilah triple constraint (Kerzner 2022).

Secara umum, pelaksanaan proyek konstruksi terbagi menjadi enam tahapan utama, yaitu:

1. Konsep dan studi kelayakan (*feasibility study*) – Tahap awal yang mencakup identifikasi kebutuhan, analisis kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan untuk memastikan proyek layak dilaksanakan.
2. Rekayasa dan desain (*engineering design*) – Tahap penyusunan gambar kerja, spesifikasi teknis, dan dokumen perencanaan lainnya yang menjadi acuan pelaksanaan.
3. Pengadaan (*procurement*) – Proses pengadaan sumber daya proyek, meliputi pemilihan kontraktor, pembelian material, dan penyediaan peralatan.
4. Pelaksanaan konstruksi (*construction*) – Tahap realisasi fisik proyek sesuai rencana dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, koordinasi sumber daya, pengendalian mutu, biaya, dan waktu sangat krusial.
5. Memulai dan penerapan (*start-up and implementation*) – Proses pengujian, penyempurnaan, dan penyerahan hasil pekerjaan kepada pengguna atau pemilik proyek.
6. Operasional dan pemanfaatan (*operation and utilization*) – Tahap pasca-konstruksi, di mana bangunan atau infrastruktur digunakan sesuai fungsi yang direncanakan, disertai pemeliharaan berkala.

Fokus skripsi ini adalah pada tahap pelaksanaan konstruksi, karena pada tahap inilah sering muncul berbagai risiko yang dapat menghambat penyelesaian proyek, termasuk keterlambatan, pembengkakan biaya, hingga kecelakaan kerja. Mengingat tahap ini sangat menentukan keberhasilan proyek secara keseluruhan, maka diperlukan strategi pengendalian yang efektif, salah satunya dengan menggunakan metode penjadwalan yang

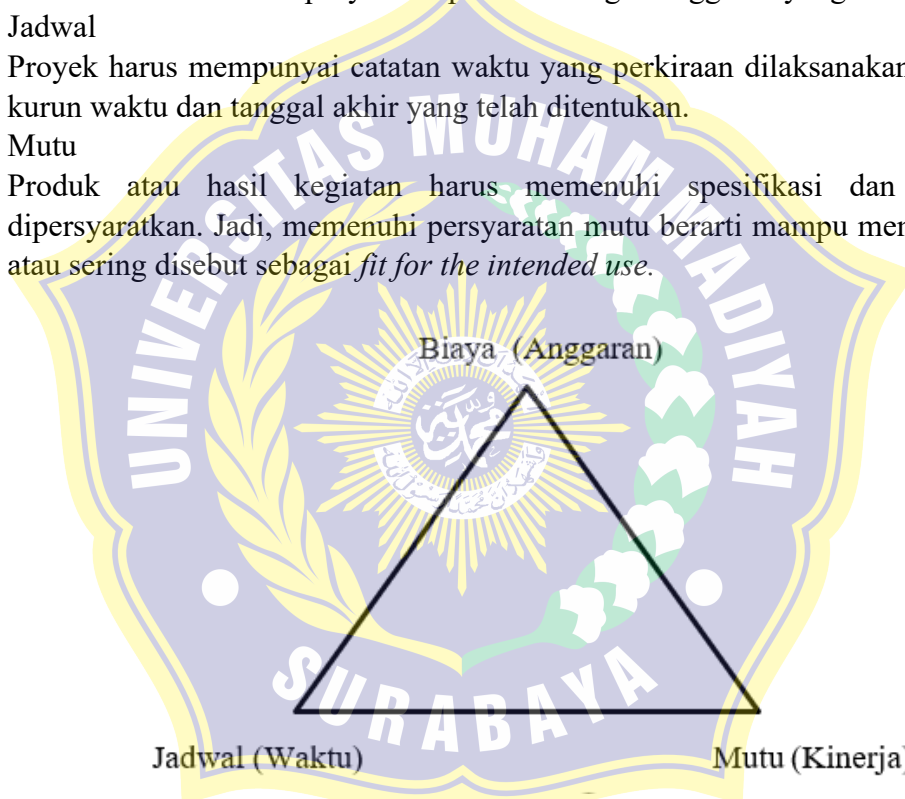
mempertimbangkan ketidakpastian, seperti simulasi Monte Carlo.

2.2. Manajemen Proyek

2.2.1. Definisi Manajemen Proyek

Manajemen proyek adalah suatu pendekatan untuk merencanakan, mengatur, dan mengelola proyek dari awal hingga akhir dengan memastikan berjalan sesuai dengan rencana. Dalam proyek untuk mewujudkan tujuan dari suatu proyek, maka harus ada batasan yang harus dipenuhi yaitu besar biaya (anggaran), jadwal, serta mutu yang harus dipenuhi (Rosmariyani 2023) Menurut Ketiga batasan disebut merupakan tiga kendala (*triple constraint*) yaitu:

1. Anggaran
Anggaran merupakan suatu rencana keuangan yang memperkirakan biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proyek. Hal ini sangat penting karena sebagai alat untuk memastikan proyek tetap sesuai dengan anggaran yang sudah tersedia.
2. Jadwal
Proyek harus mempunyai catatan waktu yang perkiraan dilaksanakan sesuai dengan kurun waktu dan tanggal akhir yang telah ditentukan.
3. Mutu
Produk atau hasil kegiatan harus memenuhi spesifikasi dan kriteria yang dipersyaratkan. Jadi, memenuhi persyaratan mutu berarti mampu memenuhi standart atau sering disebut sebagai *fit for the intended use*.



Gambar 2.1 *triple constraint*

Sumber: <https://kelas.work/blogs/elemen-triangle-project> (2025)

2.2.2. Tujuan Manajemen Proyek

Sebuah proyek terdiri dari pekerjaan, kegiatan, fungsi atau tugas yang terkait antara yang satu dengan yang lain dalam beberapa cara. Tujuannya supaya proyek dapat diselesaikan sesuai dengan taget yang ditentukan. Setiap proyek memiliki satu tujuan tertentu dimulai pada saat tertentu dan selesai ketika tujuannya telah terpenuhi. Untuk penyelesaian suatu proyek, diperlukan dua hal dasar sumber daya material dan sumber daya manusia. Manajemen proyek melibatkan tiga fase yaitu: Perencanaan proyek, Penjadwalan proyek dan Pengendalian proyek. Dari ketiga fase manajemen proyek di atas, fase pertama dan kedua harus diselesaikan sebelum proyek sebenarnya dimulai. Sedangkan, fase ketiga terlaksana selama pelaksanaan proyek.

Tujuannya untuk mengetahui masalah-masalah yang terjadi selama pelaksanaan dan menerapkan langkah-langkah untuk mengatasi masalah yang terjadi tersebut

2.2.3. Fungsi Manajemen Proyek

Dalam fungsinya menggerakkan organisasi, manajemen merupakan suatu proyek yang dinamis yang meliputi fungsi-fungsi *planning, organizing, actualing, controlling* dan lain-lain. Manajemen merupakan suatu rangkaian pekerjaan yang berkaitan serta berfungsi satu sama lain. Fungsi manajemen ada empat (Rosmariyani 2023) yaitu:

1. *Planning* (Perencanaan)
Fase ini meliputi penetapan sasaran, mendefinisikan proyek dan organisasi tim-nya.
2. *Organizing* (Pengorganisasian)
Fase ini menghubungkan sumber daya manusia, uang dan material untuk kegiatan khusus untuk menghubungkan masing-masing kegiatan satu dengan yang lainnya.
3. *Actuating* (Pelaksanaan)
Dalam pelaksanaan proyek, penting untuk menjalankan seluruh aktifitas atau pekerjaan sesuai jadwal yang direncanakan agar tidak mengalami masalah terutama keterlambatan.
4. *Controlling* (Pengawasan)
Perusahaan mengawasi sumber daya, biaya, kualitas dan anggaran. Perusahaan juga merevisi rencana dan menggeser atau mengelola kembali sumber daya agar dapat memenuhi kebutuhan waktu dan biaya.

2.2.4. Siklus Hidup Proyek Konstruksi

Siklus hidup proyek konstruksi merupakan rangkaian tahapan yang menggambarkan perjalanan suatu proyek mulai dari identifikasi kebutuhan hingga pekerjaan selesai dan diserahterimakan. Setiap tahap memiliki tujuan, aktivitas, serta keluaran (output) berbeda yang saling berkaitan. Pemahaman mengenai siklus hidup proyek sangat penting untuk memastikan pengelolaan waktu, biaya, mutu, dan risiko dapat berjalan secara terstruktur, tahapan utama siklus hidup proyek konstruksi (Project Management Institute 2021) terdiri atas:

1. Tahap Inisiasi (Initiation Phase)
Tahap ini berfokus pada identifikasi kebutuhan proyek, analisis kelayakan teknis dan ekonomi, serta penetapan ruang lingkup awal. Studi kelayakan dan analisis manfaat-biaya biasanya dilakukan untuk menentukan apakah proyek layak dilanjutkan.
2. Tahap Perencanaan (Planning Phase)
Pada tahap ini disusun dokumen perencanaan teknis, estimasi biaya, jadwal proyek, rencana manajemen risiko, serta strategi pelaksanaan. Penjadwalan dengan metode CPM, PERT, maupun network planning disusun sebagai dasar pengendalian waktu.
3. Tahap Pelaksanaan (Execution Phase)
Seluruh rencana yang telah disusun mulai diimplementasikan. Pekerjaan konstruksi dilakukan di lapangan sesuai spesifikasi teknis. Koordinasi antar pihak seperti kontraktor, konsultan pengawas, dan pemilik proyek sangat menentukan kelancaran pelaksanaan.
4. Tahap Pengendalian (Monitoring and controlling phase)

Tahap ini berjalan bersamaan dengan pelaksanaan konstruksi. Kegiatan pengendalian mencakup pemantauan kemajuan, identifikasi deviasi, evaluasi risiko, serta penentuan tindakan korektif untuk memastikan pekerjaan tetap sesuai rencana waktu, biaya, dan mutu.

5. Tahap Penutup Proyek (Closing Phase)

Tahap akhir yang mencakup penyelesaian seluruh pekerjaan fisik, pemeriksaan mutu, uji fungsi, serah terima akhir, serta penyusunan laporan akhir proyek. Dokumentasi dan evaluasi kinerja proyek menjadi bagian penting pada tahap ini.

2.2.5. Pengendalian Waktu Dalam Proyek Kontruksi

Pengendalian waktu merupakan salah satu aspek utama dalam manajemen proyek yang bertujuan memastikan seluruh aktivitas konstruksi dapat diselesaikan sesuai jadwal yang telah direncanakan. Pengendalian waktu dilakukan melalui proses pemantauan, evaluasi, dan tindakan korektif apabila terjadi deviasi antara rencana dan realisasi di lapangan. Dalam proyek konstruksi, pengendalian waktu sangat penting karena keterlambatan dapat menimbulkan dampak signifikan terhadap biaya, mutu, hubungan kontraktual, serta produktivitas tenaga kerja. Secara umum, proses pengendalian waktu meliputi beberapa langkah utama yaitu:

1. Pemantauan Kemajuan (*Progress Monitoring*)
Tahap ini dilakukan dengan membandingkan kemajuan aktual dengan jadwal rencana. Metode seperti kurva-S, bar chart, maupun laporan mingguan digunakan untuk mengetahui apakah pekerjaan berada di jalur yang benar. Data progres menjadi dasar evaluasi performa time schedule.
2. Identitas deviasi waktu (*Variance Analysis*)
Deviasi antara rencana dan realisasi dianalisis untuk mengetahui penyebab keterlambatan. Variance dapat terjadi akibat faktor internal (produktivitas rendah, kekurangan material, gangguan alat) maupun eksternal (cuaca, logistik, kondisi lapangan).
3. Evaluasi Dampak Terhadap Jadwal
Setiap deviasi dianalisis dampaknya terhadap lintasan kritis. Aktivitas yang berada pada lintasan kritis memiliki pengaruh langsung terhadap durasi total proyek, sehingga membutuhkan tindakan korektif segera. Metode CPM biasanya digunakan untuk melihat aktivitas mana yang dapat mengalami percepatan (*crashing*).
4. Tindakan Korektif (*Corrective Action*)
Tindakan korektif dilakukan untuk mengembalikan jadwal proyek sesuai rencana. Bentuk tindakan dapat berupa penambahan sumber daya, perubahan metode kerja, penjadwalan ulang, atau penerapan shift kerja tambahan. Keputusan percepatan harus mempertimbangkan biaya tambahan dan risiko operasional.
5. Evaluasi Dan Pengendalian Berkelanjutan
Pengendalian waktu bukan hanya respons terhadap deviasi, tetapi juga proses terus-menerus selama masa konstruksi. Evaluasi berkala memastikan proyek tetap berjalan sesuai jadwal atau dilakukan revisi terukur apabila diperlukan.

Dengan penerapan pengendalian waktu yang sistematis, manajer proyek dapat meningkatkan peluang penyelesaian tepat waktu dan meminimalkan dampak risiko keterlambatan pada proyek konstruksi.

2.2.6. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Keterlambatan Proyek

Menurut (Alaghbari, W., Kadir, M. R. A., Salim, A. 2023) Keterlambatan proyek dalam konstruksi merupakan kondisi ketika pekerjaan tidak dapat diselesaikan sesuai jadwal yang telah direncanakan, dan hal ini dipengaruhi oleh berbagai faktor saling terkait. Secara umum, keterlambatan dapat disebabkan oleh perencanaan jadwal yang kurang akurat, ketidakpastian material, produktivitas tenaga kerja yang tidak stabil, hingga kondisi lapangan yang berubah-ubah. Dalam lima tahun terakhir, berbagai skripsi menekankan bahwa faktor dominan penyebab keterlambatan meliputi keterlambatan pasokan material dari pemasok, koordinasi yang kurang efektif antar-stakeholder, perubahan desain selama pelaksanaan, serta faktor eksternal seperti cuaca ekstrem dan kendala administratif. Skripsi terbaru juga menyoroti bahwa praktik manajemen proyek yang kurang optimal termasuk pengendalian waktu yang tidak konsisten, komunikasi yang lambat, dan keputusan yang tidak cepat memperbesar risiko keterlambatan. Dengan memahami faktor-faktor tersebut, manajer proyek dapat merancang strategi mitigasi yang lebih tepat dan meningkatkan peluang penyelesaian proyek sesuai target.

2.3. Penjadwalan Proyek

2.3.1. Pengertian Penjadwalan Proyek

Penjadwalan proyek merupakan proses pengaturan dan pengelolaan waktu pelaksanaan seluruh aktivitas yang terdapat dalam suatu proyek konstruksi. Proses ini mencakup penentuan urutan pekerjaan, estimasi durasi, serta hubungan ketergantungan antaraktivitas sehingga alur pekerjaan dapat tersusun secara sistematis. Melalui penjadwalan yang baik, manajer proyek dapat memantau progres pelaksanaan, mengidentifikasi potensi keterlambatan, serta merumuskan strategi pengendalian apabila terjadi deviasi dari rencana. Penjadwalan juga menjadi alat komunikasi penting bagi seluruh pihak yang terlibat, karena memberikan gambaran jelas mengenai waktu mulai, waktu berakhir, dan sumber daya yang diperlukan untuk setiap aktivitas. Dengan demikian, penjadwalan proyek tidak hanya berfungsi sebagai pedoman pelaksanaan, tetapi juga sebagai instrumen untuk memastikan bahwa proyek dapat berjalan efisien dan selesai sesuai target waktu yang telah ditetapkan.

2.3.2. Manfaat Penjadwalan Proyek

Menurut (Handayani 2021) Penjadwalan proyek memiliki peran penting dalam memastikan seluruh aktivitas konstruksi berjalan sesuai arah, waktu, dan penggunaan sumber daya yang direncanakan. Melalui penjadwalan yang baik, proses pengendalian waktu menjadi lebih efektif, koordinasi antar pihak semakin optimal, dan risiko keterlambatan dapat diminimalkan. Berikut adalah manfaat utama dari penjadwalan proyek:

1. Mengoptimalkan Penggunaan Sumber Daya

Penjadwalan memungkinkan perencanaan untuk mengalokasikan tenaga kerja, material, dan peralatan secara tepat waktu dan sesuai kebutuhan. Dengan mengetahui urutan aktivitas dan durasinya, sumber daya dapat dikelola lebih efisien sehingga tidak terjadi pemborosan, kekurangan, atau penumpukan material yang tidak diperlukan. Efisiensi

- ini berdampak langsung pada peningkatan produktivitas dan penghematan biaya proyek.
2. **Mengidentifikasi dan Mengendalikan Aktivitas Kritis**
Dalam proses penjadwalan, metode seperti *Critical Path Method* (CPM) digunakan untuk mengidentifikasi aktivitas yang berada pada lintasan kritis. Aktivitas tersebut memiliki pengaruh langsung terhadap durasi total proyek sehingga membutuhkan pengawasan yang lebih intensif. Dengan mengetahui aktivitas kritis, manajer proyek dapat memusatkan perhatian pada pekerjaan paling penting agar tidak terjadi keterlambatan.
 3. **Mempermudah Pemantauan dan Evaluasi Progres**
Penjadwalan menyediakan dasar yang jelas untuk membandingkan progres aktual dengan rencana awal. Perbedaan antara rencana dan pelaksanaan dapat dengan mudah diidentifikasi sehingga tindakan korektif dapat segera dilakukan. Evaluasi yang rutin ini membantu menjaga agar pelaksanaan proyek tetap berada dalam jalur yang sesuai.
 4. **Meningkatkan Koordinasi dan Komunikasi Antar Pihak**
Jadwal proyek memberikan gambaran umum mengenai keterkaitan antaraktivitas, waktu pelaksanaan, serta peran masing-masing pihak. Hal ini meningkatkan koordinasi dan mengurangi potensi miskomunikasi karena semua pihak memiliki panduan waktu yang sama. Akibatnya, pelaksanaan pekerjaan menjadi lebih teratur dan selaras.
 5. **Mengurangi Resiko Keterlambatan Proyek**
Dengan jadwal yang lengkap dan terstruktur, potensi hambatan dapat diidentifikasi sejak awal. Tindakan mitigasi dapat direncanakan dan diterapkan sebelum masalah berkembang menjadi keterlambatan yang signifikan. Penjadwalan yang baik juga membantu merencanakan skenario alternatif apabila terjadi penyimpangan dari rencana.

2.3.3. Jenis-Jenis Penjadwalan Proyek

Penjadwalan proyek dapat disusun menggunakan berbagai metode tergantung pada kebutuhan analisis, tingkat kompleksitas proyek, dan detail hubungan antaraktivitas yang ingin ditampilkan. Setiap jenis penjadwalan memiliki karakteristik serta kegunaannya masing-masing dalam membantu perencanaan mengatur urutan pekerjaan, durasi, dan ketergantungan aktivitas. Berikut adalah jenis-jenis penjadwalan yang umum digunakan dalam proyek konstruksi:

1. **Gantt Chart (Bar Chart)**
Gantt Chart merupakan metode penjadwalan yang paling sederhana dan sering digunakan pada tahap awal perencanaan. Penyajian jadwal berbentuk diagram batang horizontal memudahkan pengguna memahami durasi, urutan, dan waktu pelaksanaan setiap aktivitas secara visual. Meski mudah digunakan, Gantt Chart memiliki keterbatasan dalam menunjukkan hubungan ketergantungan antaraktivitas secara detail, namun tetap efektif sebagai alat komunikasi awal dengan pihak proyek.
2. **Critical Path Method (CPM)**
Critical Path Method adalah metode penjadwalan yang mengidentifikasi jalur aktivitas

terpanjang yang menentukan durasi total proyek. CPM menyajikan hubungan logis antaraktivitas serta memberi informasi mengenai float atau kelonggaran waktu pada aktivitas non-kritis. Dengan mengetahui jalur kritis, manajer proyek dapat memfokuskan pengendalian pada aktivitas yang mempengaruhi waktu penyelesaian proyek, sehingga risiko keterlambatan dapat lebih mudah diantisipasi.

3. Program Evaluation and Review Technique (PERT)

PERT digunakan pada proyek yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi dalam durasi aktivitas. Metode ini menggunakan tiga perkiraan waktu optimis, realistis, dan pesimis untuk menghitung nilai rata-rata durasi aktivitas. Dengan pendekatan probabilistik, PERT membantu memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai variasi waktu penyelesaian proyek, terutama pada kegiatan yang memiliki risiko atau ketidakpastian durasi yang signifikan.

4. Line of Balance (LOB)

Line of Balance merupakan metode penjadwalan yang ideal untuk proyek yang memiliki aktivitas berulang dalam jumlah besar, seperti pembangunan perumahan, gedung bertingkat, atau proyek jalan. Metode ini menampilkan hubungan antara urutan aktivitas dan kecepatan pelaksanaan, sehingga dapat mencegah terjadinya konflik antar tim di lokasi kerja. LOB membantu menjaga aliran kerja yang stabil sehingga produktivitas dapat dipertahankan.

5. Resource Allocation and Leveling Schedule

Jenis penjadwalan ini berfokus pada pemerataan penggunaan sumber daya selama pelaksanaan proyek. Ketika beberapa aktivitas memerlukan sumber daya yang sama dalam jumlah besar, metode ini membantu menyeimbangkan distribusi tenaga kerja atau peralatan agar beban tidak menumpuk pada periode tertentu. Dengan demikian, biaya dapat ditekan dan efisiensi pelaksanaan dapat ditingkatkan.

2.4. Durasi Dan Keterlambatan Proyek

2.4.1. Durasi

Durasi merupakan proses mengatur waktu untuk setiap tugas atau aktivitas dalam sebuah proyek. Setiap aktivitas mencakup seluruh pekerjaan yang dibutuhkan agar proyek dapat diselesaikan secara optimal, dengan tetap memperhatikan berbagai keterbatasan yang ada. Untuk menentukan lama waktu pengerjaan, digunakan sebuah rumus perhitungan durasi pekerjaan (Silviana 2023):

$$\text{Durasi Pekerjaan} = \frac{\text{Volume}}{\text{Prestasi Kerja Perhari}} \quad (2.1)$$

2.4.2. Keterlambatan

Keterlambatan proyek (project delay) merupakan salah satu permasalahan paling umum dalam industri konstruksi yang berhubungan langsung dengan kegagalan pencapaian target waktu sesuai perencanaan. Secara umum, keterlambatan proyek diartikan sebagai kondisi ketika penyelesaian pekerjaan memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan jadwal yang telah direncanakan atau disepakati dalam dokumen kontrak, dalam kontrak konstruksi, jadwal rencana biasanya disusun berdasarkan estimasi durasi setiap aktivitas, penentuan jalur kritis,

serta mempertimbangkan potensi risiko. Apabila dalam pelaksanaannya terjadi deviasi negatif pada jadwal, maka kondisi tersebut dikategorikan sebagai keterlambatan.

Keterlambatan proyek tidak hanya berdampak pada waktu penyelesaian tetapi juga pada biaya. Biaya tambahan sering kali muncul akibat percepatan pekerjaan untuk mengejar ketertinggalan, yang dapat menurunkan kualitas hasil akhir. (Rizal 2024) menyebutkan bahwa semakin tinggi faktor jadwal pekerjaan dan manajerial lapangan serta perubahan desain, tenaga kerja dan pengalaman kerja serta kepemimpinan, bahan konstruksi dan situasi lingkungan, maka semakin tinggi pemakaian biaya. Dampak keterlambatan dapat mengakibatkan turunnya kualitas konstruksi, karena pekerjaan dilakukan dengan tergesa-gesa untuk memenuhi tenggat waktu. Menurut (Anarpito 2022) menyebutkan apabila proyek konstruksi penjadwalannya tidak memperhitungkan karakter dari pekerjaannya maka unit pekerjaan berulang tersebut akan mengalami penundaan (lag). Hal ini juga mempengaruhi lamanya durasi pelaksanaan proyek.

Beberapa literatur memandang keterlambatan tidak hanya dari aspek teknis, tetapi juga dari sisi kontraktual. Menurut Jamal dan (Jamal, J., & Ian 2025), dalam berdasarkan skripsi yang dilakukan di berbagai lokasi dan jenis proyek, terdapat beberapa faktor utama yang menyebabkan keterlambatan dalam proyek konstruksi di Indonesia:

1. Kesalahan dalam perencanaan: ketidakjelasan gambar rencana dan spesifikasi yang tidak detail sering kali menjadi sumber masalah. Hal ini menyebabkan kesulitan dalam pelaksanaan di lapangan.
2. Manajemen Proyek yang Lemah: Kurangnya koordinasi antara tim proyek, serta penerapan manajemen yang tidak efektif dapat memperburuk situasi dan menyebabkan keterlambatan.
3. Masalah Keuangan: Kesulitan keuangan pada kontraktor dapat menghambat kemampuan mereka untuk memenuhi komitmen waktu, termasuk pembayaran kepada subkontraktor dan pemasok.
4. Ketersediaan Material: Keterlambatan dalam pengiriman material atau tidak tersedianya material sesuai spesifikasi dapat mengakibatkan penundaan dalam pelaksanaan pekerjaan.
5. Faktor Eksternal: Cuaca buruk, bencana alam, atau masalah sosial seperti konflik masyarakat juga berkontribusi terhadap keterlambatan proyek.

Keterlambatan proyek tidak hanya berdampak pada aspek waktu, tetapi juga membawa konsekuensi finansial dan non-finansial. Dampak finansial meliputi peningkatan biaya tenaga kerja, perpanjangan sewa peralatan, dan denda keterlambatan (*liquidated damages*). Dampak non-finansial mencakup penurunan reputasi perusahaan, terganggunya hubungan dengan pemilik proyek, serta hambatan pada pelaksanaan proyek-proyek selanjutnya.

Oleh karena itu, keterlambatan proyek perlu dikelola melalui strategi perencanaan yang matang, identifikasi risiko sejak awal, dan penggunaan metode penjadwalan yang mempertimbangkan ketidakpastian, seperti simulasi Monte Carlo. Dengan demikian, potensi keterlambatan dapat diminimalkan dan keberhasilan proyek dapat lebih terjamin.

2.5. Proyek Breakwater

2.5.1. Pengertian Breakwater

(Hariati, Taqwa, and Alimuddin 2022) Breakwater atau pemecah gelombang merupakan salah satu bangunan pelindung pantai yang dirancang dan dibangun untuk mengurangi energi gelombang laut sebelum mencapai garis pantai. Secara umum, breakwater dibangun sejajar dengan garis pantai pada jarak tertentu di lepas pantai (offshore) maupun terhubung langsung dengan daratan (onshore), tergantung pada kondisi perairan, tujuan perlindungan, serta karakteristik pantai yang dilindungi. Keberadaan breakwater bertujuan untuk menciptakan kondisi perairan yang lebih tenang di area belakang bangunan, sehingga aktivitas di kawasan pantai dapat berlangsung dengan lebih aman dan stabil.

Secara fungsional, breakwater bekerja sebagai penghalang buatan yang memecah, memantulkan, dan menyerap sebagian energi gelombang laut. Ketika gelombang laut menghantam struktur breakwater, energi gelombang tersebut akan berkurang akibat proses refleksi, difraksi, dan disipasi energi pada permukaan serta lapisan struktur bangunan. Proses ini menyebabkan tinggi dan kecepatan gelombang yang mencapai pantai menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi alami tanpa perlindungan. Dengan demikian, tekanan gelombang yang bekerja pada garis pantai dapat diminimalkan.

Penurunan energi gelombang yang signifikan akibat keberadaan breakwater memberikan dampak positif terhadap stabilitas garis pantai. Risiko terjadinya erosi dan abrasi pantai dapat ditekan, sehingga perubahan garis pantai yang merugikan dapat dikendalikan. Selain itu, breakwater juga berperan penting dalam melindungi berbagai fasilitas pantai, seperti pelabuhan, dermaga, kawasan pemukiman, serta infrastruktur pesisir lainnya dari kerusakan akibat gelombang dan arus laut yang kuat.

Dengan fungsi dan manfaat tersebut, breakwater menjadi salah satu solusi teknik yang banyak diterapkan dalam upaya pengendalian kerusakan pantai dan perlindungan wilayah pesisir. Perencanaan dan pembangunan breakwater harus mempertimbangkan kondisi oseanografi, karakteristik gelombang, kedalaman perairan, serta aspek lingkungan, agar bangunan yang direncanakan dapat berfungsi secara optimal dan berkelanjutan.

2.5.2. Fungsi Breakwater

Breakwater atau pemecah gelombang memiliki peranan penting dalam perlindungan wilayah pesisir dari pengaruh energi gelombang laut. Secara umum, fungsi utama breakwater adalah mengurangi energi gelombang yang menuju ke pantai atau kawasan perairan tertentu sehingga tercipta kondisi perairan yang lebih tenang dan aman. Dengan berkurangnya energi gelombang, dampak negatif gelombang laut terhadap lingkungan pesisir dan infrastruktur dapat diminimalkan dapat juga dijabarkan sebagai berikut (Pasaribu et al. 2023):

1. **Mereduksi Energi Gelombang Laut**
Breakwater berfungsi untuk mengurangi tinggi dan energi gelombang laut sebelum mencapai pantai atau kawasan perairan tertentu. Proses reduksi energi ini terjadi melalui mekanisme pemecahan, pemantulan, dan penyerapan energi gelombang oleh struktur bangunan.
2. **Melindungi Pantai dari Erosi dan Abrasi**
Dengan berkurangnya energi gelombang yang mencapai garis pantai, laju erosi dan abrasi pantai dapat ditekan. Hal ini berperan penting dalam menjaga stabilitas garis

pantai serta mencegah kehilangan material pantai akibat hantaman gelombang secara terus-menerus.

3. Menciptakan Perairan yang Lebih Tenang

Breakwater mampu menciptakan kondisi perairan yang relatif tenang di area belakang bangunan. Kondisi ini sangat dibutuhkan untuk mendukung aktivitas kelautan, seperti sandar kapal, pergerakan perahu nelayan, serta kegiatan bongkar muat di pelabuhan.

4. Melindungi Infrastruktur dan Fasilitas Pesisir

Keberadaan breakwater dapat melindungi berbagai fasilitas pesisir, seperti pelabuhan, dermaga, kawasan pemukiman, dan bangunan lainnya dari kerusakan akibat gelombang laut yang besar dan tidak stabil.

5. Mengendalikan Pola Arus dan Sedimentasi

Breakwater berfungsi dalam mengendalikan pola arus dan distribusi sedimen di wilayah pesisir. Dengan perencanaan yang tepat, bangunan ini dapat membantu mengurangi pengangkutan sedimen berlebih serta mendukung proses pengendapan sedimen di area tertentu.

6. Meningkatkan Keamanan dan Kenyamanan Aktivitas Pesisir

Dengan kondisi perairan yang lebih tenang dan terlindungi, breakwater meningkatkan tingkat keamanan dan kenyamanan bagi masyarakat pesisir dan pengguna fasilitas laut, baik dalam aktivitas ekonomi maupun sosial.

2.6. Time Schedule

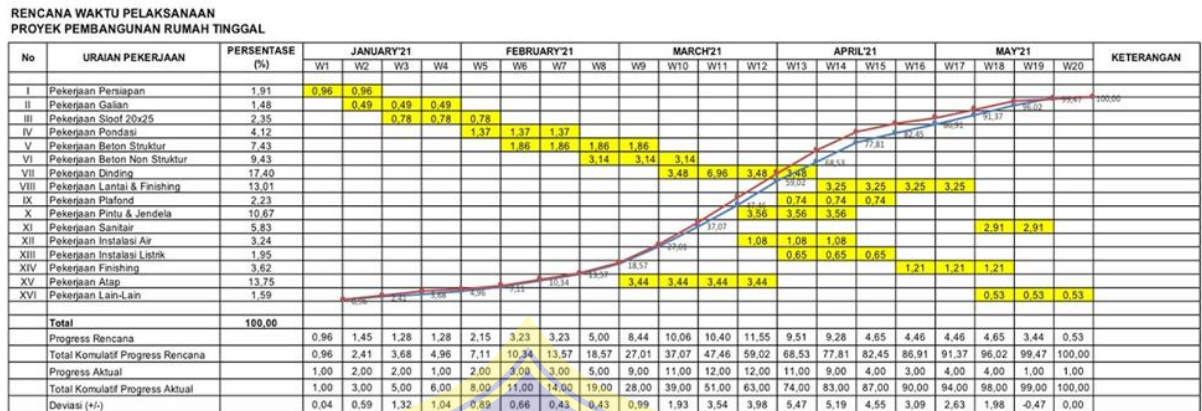
Time Schedule adalah rangkain kegiatan yang memiliki bentuk seperti huruf "S". *Time Schedule* ini menunjukkan perkembangan proyek sesuai dengan tahapan kegiatan yang sedang berlangsung. Pengaturan waktu sangat penting untuk memastikan keberhasilan pekerjaan yang dilaksanakan. Sebelum pekerjaan dimulai, setelah kontrak kerja ditandatangani, perlu dibuat *Time Schedule* sebagai pedoman pelaksanaan (Suramli et al. 2025).

Time Schedule merupakan langkah awal yang sangat krusial untuk memastikan kualitas pekerjaan sejak awal proyek. Penjadwalan (*Time Schedule*) proyek termasuk elemen penting dari perencanaan yang menyediakan informasi mengenai jadwal rencana serta perkembangan proyek, terutama terkait kinerja sumber daya seperti biaya, tenaga kerja, peralatan, dan material. Selain itu, penjadwalan juga mencakup perkiraan durasi proyek dan progres waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek.

Melalui *Time Schedule*, kita bisa mendapatkan gambaran mengenai durasi penyelesaian pekerjaan serta kaitan antar bagian pekerjaan yang saling berhubungan. Sebelum menyusun rencana kerja, penting untuk memperhatikan bagian-bagian pekerjaan yang saling berkaitan, serta pekerjaan yang bisa dimulai tanpa harus menunggu penyelesaian pekerjaan lain. Penjadwalan (*Time Schedule*) memungkinkan kita untuk mengetahui kapan setiap kegiatan akan dimulai, ditunda, atau diselesaikan. Secara umum, penjadwalan proyek menerapkan prakiraan waktu yang pasti. Faktor yang menyebabkan durasi ini menjadi tidak pasti diantaranya adalah sumber daya manusia, produktivitas kerja, alam, dan lain sebagainya.

Kurva S secara grafis adalah gambaran dari kemajuan kerja (bobot %) kumulatif pada sumbu vertikal terhadap waktu pada sumbu horizontal. Bobot kegiatan adalah nilai persentase proyek dimana dipakai untuk mengetahui kemajuan proyek tersebut. Kemajuan kegiatan

biasanya diukur terhadap jumlah uang yang telah dikeluarkan oleh proyek. Visualisasi kurva S dapat memberikan informasi mengenai kemajuan proyek dengan membandingkan kurva S rencana dan kurva S pelaksanaan.(Fauza, M., & Kartika 2020)



Gambar 2.2 Kurva S
Sumber : Fauza & Kartika 2020

2.7. Analisa Kinerja Proyek

Menurut (Tzaveas, Katsavounis, and Kalfakakou 2019), analisis kinerja proyek merupakan suatu proses evaluasi yang dilakukan untuk menilai tingkat kesesuaian antara rencana pelaksanaan proyek dengan realisasi pekerjaan yang terjadi di lapangan. Analisis ini berperan penting dalam manajemen proyek karena memungkinkan pihak pengelola proyek untuk mengetahui sejauh mana pelaksanaan pekerjaan telah berjalan sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan. Melalui analisis kinerja proyek, dapat diidentifikasi adanya deviasi waktu yang terjadi selama pelaksanaan, baik berupa keterlambatan maupun percepatan pekerjaan.

Lebih lanjut, analisis kinerja proyek bertujuan untuk mengukur besarnya keterlambatan yang terjadi secara kuantitatif serta memperkirakan sisa waktu yang masih dibutuhkan hingga proyek mencapai tingkat penyelesaian 100%. Informasi mengenai deviasi waktu dan estimasi sisa durasi tersebut menjadi dasar penting dalam pengambilan keputusan manajerial, khususnya dalam menentukan tindakan korektif dan strategi percepatan yang diperlukan agar proyek dapat kembali berada pada jalur jadwal yang direncanakan.

Evaluasi kinerja waktu proyek umumnya dilakukan dengan membandingkan kurva-S rencana dan kurva-S realisasi. Kurva-S rencana menggambarkan target progres kumulatif pekerjaan yang direncanakan dari waktu ke waktu, sedangkan kurva-S realisasi menunjukkan capaian progres aktual di lapangan. Apabila progres aktual berada di bawah progres rencana, maka proyek dinyatakan mengalami keterlambatan waktu (*schedule delay*). Sebaliknya, apabila progres aktual berada di atas progres rencana, maka proyek dapat dikategorikan berjalan lebih cepat dari jadwal yang direncanakan.

Deviasi antara kurva-S rencana dan kurva-S realisasi mencerminkan tingkat penyimpangan pelaksanaan proyek terhadap rencana awal. Semakin besar jarak antara kedua kurva tersebut, semakin besar pula tingkat penyimpangan kinerja waktu proyek. Oleh karena itu, analisis deviasi kurva-S menjadi alat yang efektif untuk memantau kinerja proyek secara

berkelanjutan serta sebagai dasar dalam merumuskan strategi pengendalian dan percepatan pekerjaan, khususnya pada aktivitas yang berada di lintasan kritis.

2.6.1 *Schedule Performance Index (SPI)*

Untuk mengukur kinerja waktu proyek secara kuantitatif, digunakan indikator *Schedule Performance Index* (SPI), SPI merupakan rasio yang menunjukkan perbandingan antara progres pekerjaan yang direncanakan dengan progres pekerjaan yang terealisasi pada periode tertentu. Nilai SPI digunakan untuk mengetahui apakah kinerja waktu proyek berada dalam kondisi lebih cepat, sesuai, atau lebih lambat dari jadwal rencana, Secara matematis, *Schedule Performance Index* (SPI) dapat dirumuskan sebagai berikut (Project Management Institute 2021):

$$SPI = \frac{\text{Progres Rencana}}{\text{Progres Realisasi}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- SPI = *Schedule performance Index*
- Progres Rencana = persentase progres pekerjaan berdasarkan jadwal rencana
- Progres Realisasi = persentase progres pekerjaan aktual di lapangan

Secara umum, interpretasi nilai SPI adalah sebagai berikut:

- SPI > 1 menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan lebih cepat dari jadwal rencana,
- SPI = 1 menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan sesuai dengan jadwal,
- SPI < 1 menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan mengalami keterlambatan.

Perhitungan dan analisis nilai SPI dilakukan secara periodik (mingguan) untuk mengamati pola kinerja waktu proyek selama periode pelaksanaan. Fluktuasi nilai SPI mencerminkan perubahan kinerja proyek yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi cuaca, produktivitas alat, serta hambatan operasional di lapangan.

Selain analisis SPI mingguan, dilakukan pula analisis statistik terhadap nilai SPI, yang meliputi nilai rata-rata (*mean*), nilai maksimum (*maximum*), dan nilai minimum (*minimum*). Nilai SPI rata-rata digunakan untuk menggambarkan kinerja proyek secara umum selama periode pengamatan. Nilai SPI maksimum menunjukkan kondisi kinerja terbaik yang pernah dicapai proyek, sedangkan nilai SPI minimum menggambarkan kondisi kinerja terburuk yang menunjukkan keterlambatan signifikan.

2.6.2 *Estimate to Complete (ETC)*

Estimate to Complete (ETC) merupakan parameter yang digunakan untuk memperkirakan durasi waktu yang dibutuhkan dalam menyelesaikan sisa pekerjaan proyek dengan mempertimbangkan kinerja waktu yang telah dicapai. Estimasi ini dihitung berdasarkan nilai *Schedule Performance Index* (SPI) sebagai indikator efisiensi pelaksanaan proyek terhadap jadwal.

Dalam skripsi ini, perhitungan ETC dilakukan dengan membagi waktu sisa proyek terhadap nilai SPI yang merepresentasikan kondisi kinerja tertentu, yaitu kinerja rata-rata, kinerja terbaik, dan kinerja terburuk. Dengan demikian, perhitungan ETC dibedakan menjadi tiga kondisi sebagai berikut.

1. ETC berdasarkan SPI rata-rata (ETC_mean)

ETC_mean digunakan untuk menggambarkan estimasi durasi penyelesaian proyek pada kondisi kinerja waktu rata-rata yang terjadi selama periode pengamatan. Perhitungan ETC_mean dilakukan dengan membagi waktu sisa proyek terhadap nilai SPI rata-rata, dengan rumus (Project Management Institute 2021):

$$ETC = \frac{Waktu\ Sisa\ Proyek}{SPI_{rata-rata}} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- *ETC* = Estimate to Complete (estimasi waktu penyelesaian sisa pekerjaan)
- *Waktu Sisa Proyek* = durasi pekerjaan yang belum terselesaikan sesuai rencana
- *SPI_{rata-rata}* = nilai rata – rata Schedule Performance Index selama periode pengamatan

2. ETC berdasarkan SPI minimum (*ETC_min*)

ETC_min menggambarkan estimasi waktu terburuk yang mungkin terjadi apabila kinerja proyek berada pada kondisi terendah, yaitu ketika nilai SPI berada pada tingkat minimum. Kondisi ini menunjukkan potensi keterlambatan signifikan apabila tidak dilakukan tindakan korektif. Perhitungan *ETC_min* dilakukan dengan rumus (PMI,2017):

$$ETC = \frac{Waktu\ Sisa\ Proyek}{SPI_{Minimum}} \quad (2.4)$$

Keterangan :

- *ETC* = Estimate to Complete (estimasi waktu penyelesaian sisa pekerjaan)
- *Waktu Sisa Proyek* = durasi pekerjaan yang belum terselesaikan sesuai rencana
- *SPI_{Minimum}* = nilai minimum Schedule Performance Index selama periode pengamatan

3. ETC berdasarkan SPI maksimum (*ETC_max*)

ETC_max merepresentasikan estimasi waktu tercepat yang dapat dicapai apabila kinerja proyek berada pada kondisi terbaik, yaitu ketika nilai SPI berada pada tingkat maksimum. Kondisi ini umumnya dapat dicapai melalui penerapan strategi percepatan, seperti penambahan alat berat atau peningkatan produktivitas. Rumus *ETC_max* dinyatakan sebagai berikut:

$$ETC = \frac{Waktu\ Sisa\ Proyek}{SPI_{Maksimum}} \quad (2.5)$$

Keterangan :

- *ETC* = Estimate to Complete (estimasi waktu penyelesaian sisa pekerjaan)
- *Waktu Sisa Proyek* = durasi pekerjaan yang belum terselesaikan sesuai rencana
- *SPI_{Maksimum}* = nilai max Schedule Performance Index selama periode pengamatan

Hasil perhitungan ETC memberikan informasi mengenai potensi keterlambatan maupun peluang percepatan proyek. Apabila nilai ETC lebih besar dibandingkan sisa durasi rencana, maka proyek berpotensi mengalami keterlambatan dan memerlukan tindakan korektif. Sebaliknya, apabila nilai ETC lebih kecil, maka proyek memiliki peluang untuk dipercepat melalui optimalisasi sumber daya, khususnya pada aktivitas lintasan kritis (*critical path*).

Dengan demikian, analisis kinerja proyek ini berperan penting dalam mendukung pengambilan keputusan manajerial, terutama dalam menentukan kebutuhan percepatan

pekerjaan pada lintasan kritis agar proyek Breakwater Sisi Utara Brondong Lamongan dapat diselesaikan sesuai target waktu yang direncanakan.

2.8. Alternatif Percepatan

Alternatif percepatan di dalam pelaksanaan pembangunan proyek sering dilakukan. Ada dua alasan kenapa percepatan di dalam pembangunan proyek konstruksi dilakukan. Pertama karena keinginan dari pihak owner agar proyek dapat diselesaikan sebelum batas akhir waktu penyelesaian proyek. Kedua karena di dalam pelaksanaan proyek mengalami keterlambatan waktu atau progres maka percepatan harus dilakukan (Nurjaman 2024) Ada beberapa macam cara yang dapat digunakan untuk melaksanakan percepatan penyelesaian waktu proyek. Cara-cara tersebut antara lain :

1. Penambahan *shift* kerja
2. Penambahan tenaga kerja
3. Pergantian atau penambahan peralatan
4. Pemilihan sumber daya manusia yang berkualitas
5. Penggunaan metode konstruksi yang efektif

Dalam skripsi ini terdapat dua alternatif percepatan sebagai upaya optimalisasi, yaitu penambahan tenaga kerja dan penambahan *shift* kerja. Selanjutnya akan dilakukan perbandingan dari hasil analisa percepatan kedua alternatif tersebut, dan ditarik kesimpulan alternatif mana yang lebih optimal dari segi waktu dan biaya.

2.9. Network Planning

2.8.1 Pengertian Network Planning

Suatu kegiatan yang berupa rangkaian penyelesaian pekerjaan haruslah direncanakan dengan baik. Idealnya, semua kegiatan dapat diselesaikan dengan efisiensi tinggi dan terintegrasi dengan aktivitas lainnya. Melalui penggunaan *network*, manajemen dapat merancang rencana penyelesaian proyek untuk mencapai efisiensi waktu dan biaya yang maksimal.

Network Planning adalah suatu hubungan ketergantungan antar variabel-variabel yang digambarkan dalam suatu diagram *network*. Dengan demikian, pekerjaan yang harus diprioritaskan dan kebutuhan tambahan jam kerja atau tenaga kerja dapat diidentifikasi. Hal ini bertujuan untuk mencapai efisiensi waktu dan biaya yang optimal. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan jaringan kerja (*network*) adalah:

1. Macam-macam aktivitas yang ada
2. Hubungan antar aktivitas, yang lebih dahulu diselesaikan
3. Urutan logis dari masing-masing aktivitas
4. Waktu penyelesaian tiap aktivitas

Suatu proyek akan berjalan sesuai dengan jadwal apabila semua kegiatan kerja disusun sesuai sasaran dan pencapaian target jelas. Pengendalian kegiatan yang terjadi lapangan harus dilakukan dari waktu ke waktu untuk mengantisipasi adanya keterlambatan dalam sebuah proyek diperlukan adanya suatu jaringan kerja yang disusun secara tepat, jelas dan sesuai target.

2.8.2 Symbol dan Notasi Network Planning

Dalam penyusunan *network planning*, terdapat beberapa simbol dan notasi yang dipakai, diantaranya adalah:

1. Anak Panah



Gambar 2.3 Anak Panah

Sumber : Mustangin Amin, 2025

Anak panah menggambarkan kegiatan (*activity*). Pada umumnya nama kegiatan dicantumkan di atas anak panah dan lama kegiatan ditulis di bawah anak panah. Arah anak panah menunjukkan arah kegiatan, sehingga dapat diketahui kegiatan yang mendahului (*preceding activity*) dan kegiatan yang mengikuti (*succeeding activity*). Suatu aktivitas baru dapat dimulai jika *preceding event* sudah selesai dikerjakan. Setiap anak panah biasanya disertai dengan notasi yang memberikan identifikasi nama/jenis kegiatan dan estimasi waktu penyelesaian kegiatan yang bersangkutan. Pada umumnya diberi kode huruf A, B, C dan seterusnya.

2. Lingkaran



Gambar 2.4 Lingkaran

Sumber : Mustangin Amin, 2025

Lingkaran (*node*) menggambarkan peristiwa. Setiap kegiatan selalu dimulai dengan suatu peristiwa dan diakhiri dengan suatu peristiwa juga, yaitu peristiwa mulainya kegiatan dan peristiwa selesainya kegiatan itu.

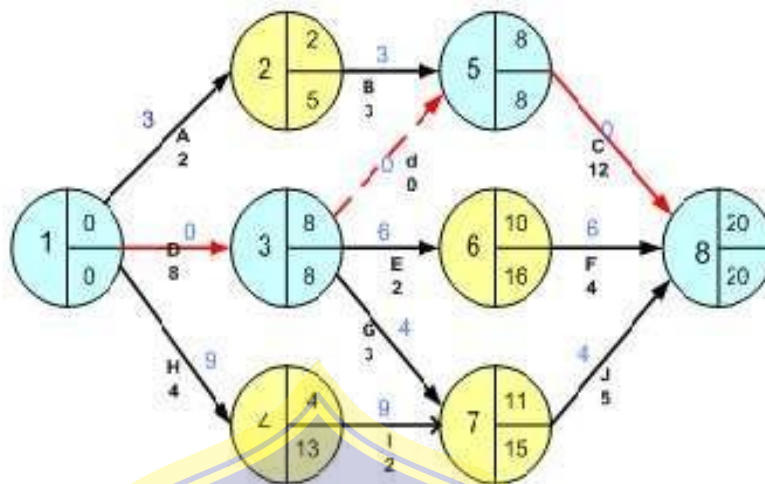
3. Anak Panah terputus-putus



Gambar 2.5 Anak Panah Putus-Putus

Sumber : Mustangin Amin, 2025

Dummy adalah penghubung antar peristiwa. *Dummy* menunjukkan suatu kegiatan semu, yang diperlukan untuk menggambarkan adanya hubungan di antara dua kegiatan. Hubungan antar peristiwa tidak perlu diperhitungkan dan karenanya tidak memiliki nama dalam perhitungan waktu, sumber daya, dan ruangan. Mengingat *dummy* merupakan kegiatan semu maka lama kegiatan *dummy* adalah nol. Cara menggambarkan anak panah yang terputus-putus sama dengan cara menggambarkan anak panah biasa.



Gambar 2.6 Network Planning
Sumber : Wardhani, R. W. K, 2017

2.8.3 Lintasan Kritis (*Critical Path*)

Jalur kritis terdiri dari rangkaian kegiatan kritis, dimulai dari kegiatan pertama sampai pada kegiatan terakhir proyek. Lintasan kritis (*Critical Path*) melalui aktivitas-aktivitas yang jumlah waktu pelaksanaannya paling lama. Jadi, lintasan kritis adalah lintasan yang paling menentukan waktu penyelesaian proyek secara keseluruhan. Dengan kata lain, lintasan kritis adalah lintasan kegiatan yang tidak boleh terlambat ataupun mengalami penundaan pelaksanaan karena keterlambatan tersebut akan menyebabkan keterlambatan pada waktu total penyelesaian proyek.

Tujuan lintasan kritis adalah untuk mengetahui dengan cepat kegiatan-kegiatan yang memiliki potensi keterlambatan, sehingga setiap saat dapat ditentukan tingkat prioritas oleh kebijaksanaan penyelenggara proyek apabila terjadi keterlambatan.

Dalam proses identifikasi jalur kritis, ada beberapa istilah atau pengertian yang akan digunakan:

Dalam penyusunan optimalisasi biaya dan waktu dengan metode *time cost trade off*, pekerjaan atau aktivitas yang berada pada lintasan kritis nantinya akan digunakan untuk analisis percepatan dengan cara kompresi jadwal. Pekerjaan kritis akan disusun dalam satu tabel untuk rekapitulasi biaya dan waktu dalam alternatif percepatan penambahan tenaga kerja dan *shift* dengan beberapa durasi.

2.10. Alat Berat

Alat berat adalah peralatan mesin berukuran besar yang dirancang untuk melaksanakan pekerjaan konstruksi skala besar, seperti pengerjaan tanah, pemindahan material, penggalian, pengangkatan, perataan permukaan, serta pemadatan. Pemanfaatan alat berat sangat penting untuk meningkatkan efisiensi, mempercepat waktu pelaksanaan proyek, sekaligus menurunkan ketergantungan pada tenaga kerja manual

2.10.1. Pengertian Alat Berat

Menurut (Dewi 2023) Alat berat merupakan peralatan mekanis berukuran besar yang digunakan untuk membantu pelaksanaan pekerjaan konstruksi, terutama pada pekerjaan yang

memerlukan tenaga besar, kapasitas angkut tinggi, serta tingkat ketelitian dan efisiensi yang tidak dapat dicapai oleh tenaga manusia secara langsung. Penggunaan alat berat bertujuan untuk meningkatkan produktivitas kerja, mempercepat waktu pelaksanaan proyek, serta menjamin mutu dan keselamatan kerja di lapangan.

Dalam proyek konstruksi, alat berat digunakan untuk berbagai jenis pekerjaan seperti penggalian, pemindahan material, pengangkatan, pemadatan, dan penataan material. Pemilihan alat berat yang tepat harus disesuaikan dengan jenis pekerjaan, kondisi lokasi proyek, kapasitas alat, serta durasi pelaksanaan pekerjaan agar dapat bekerja secara optimal dan ekonomis.

Pada proyek konstruksi infrastruktur maritim seperti breakwater, peranan alat berat menjadi sangat krusial karena pekerjaan umumnya melibatkan material dengan berat besar, kondisi medan yang sulit, serta pengaruh lingkungan pesisir seperti gelombang laut dan pasang surut. Oleh karena itu, pengelolaan dan pemanfaatan alat berat yang efektif sangat berpengaruh terhadap kelancaran pelaksanaan proyek serta pencapaian target waktu dan biaya yang telah direncanakan.

2.10.2. Pengelompokan Alat Berat Berdasarkan Fungsi

Alat berat dalam proyek konstruksi dapat dikelompokkan berdasarkan fungsi dan jenis pekerjaan yang dilaksanakan di lapangan. Pengelompokan ini bertujuan untuk memudahkan perencanaan penggunaan alat, meningkatkan efisiensi kerja, serta menyesuaikan kapasitas alat dengan kebutuhan pekerjaan. Secara umum, alat berat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori berdasarkan fungsi utamanya sebagai berikut.

1. Alat Penggalian (Excavating Equipment)

Alat penggalian digunakan untuk pekerjaan menggali tanah, pasir, atau material lainnya, baik pada pekerjaan tanah maupun pekerjaan bawah permukaan. Contoh alat berat yang termasuk dalam kelompok ini antara lain excavator, backhoe, dan dragline. Pada proyek breakwater, alat penggalian berperan dalam pekerjaan persiapan lahan dan pengambilan material dari quarry atau lokasi penimbunan, seperti yang terdapat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Excavator
Sumber : Mutiara Mutu Sertifikasi. (2022)

2. Alat Pemindahan dan Pengangkutan Material (Material Handling Equipment)

Alat ini berfungsi untuk memindahkan dan mengangkut material dari satu lokasi ke lokasi lain, baik secara horizontal maupun vertikal. Contohnya adalah dump truck, wheel loader, conveyor, dan crane. Pada pekerjaan breakwater, alat ini sangat penting untuk mengangkut batu armor dan precast tetrapod dari lokasi penumpukan menuju area pemasangan, seperti pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Excavator

Sumber : Mutiara Mutu Sertifikasi. (2022)

3. Alat Pengangkat (*Hoisting Equipment*)

Alat pengangkatan digunakan untuk mengangkat material berat ke posisi tertentu dengan ketelitian tinggi. Alat yang termasuk dalam kelompok ini antara lain crane dan derrick. Dalam konstruksi breakwater, crane digunakan untuk mengangkat dan menempatkan unit precast tetrapod atau batu berukuran besar sesuai dengan desain.



Gambar 2.9 Crane

Sumber : Mutiara Mutu Sertifikasi. (2022)

2.11. Penambahan Alat Sebagai Metode Percepatan

Metode percepatan pelaksanaan proyek dapat dilakukan melalui berbagai strategi, salah satunya dengan penambahan jumlah alat kerja pada aktivitas-aktivitas yang berada di jalur kritis. Penambahan alat bertujuan untuk meningkatkan kapasitas produksi harian sehingga durasi pekerjaan dapat dipersingkat tanpa mengubah spesifikasi teknis maupun mutu pekerjaan.

Secara prinsip, percepatan melalui penambahan alat dilakukan dengan meningkatkan output kerja per satuan waktu, sehingga volume pekerjaan dapat diselesaikan dalam durasi yang lebih singkat dibandingkan dengan rencana awal. Mekanisme percepatan ini dianggap efektif apabila peningkatan produktivitas sebanding dengan biaya tambahan yang dikeluarkan dan tidak menimbulkan konflik ruang kerja (*work space conflict*) di lapangan.

2.11.1. Rumus Perhitungan Kebutuhan Alat

Produktivitas alat berat dapat dihitung menggunakan beberapa rumus (Sutanto, K. R., Kosasi, M. H. 2015), antara lain:

1. Produktivitas *Excavator*

- Waktu Siklus (Cycle Time)

$$T_C = \frac{t_{ambil} + t_{swing1} + t_{buang} + t_{swing2}}{60\%} \quad (2.6)$$

- Produktivitas per alat

$$P = \frac{3600}{T_C} \times C \quad (2.7)$$

- Waktu yang diperlukan *Excavator*

$$T_{durasi} = \frac{Volume}{p \times 8 \text{ jam kerja}} \quad (2.8)$$

Keterangan :

T_C = Waktu siklus detik/ m^3

P = Produktivitas alat m^3 /jam

C = satuan (misal: 1 unit matras persiklus)

T_{durasi} = waktu yang diperlukan excavator

2. Produktivitas *Crane*

- Waktu Siklus (Cycle Time)

$$T_C = \frac{t_{ambil} + t_{swing1} + t_{buang} + t_{swing2}}{60\%} \quad (2.9)$$

- Produktivitas per alat

$$P = \frac{3600}{T_C} \times C \quad (2.10)$$

- Waktu yang diperlukan *Crane*

$$T_{durasi} = \frac{Volume}{p \times 8 \text{ jam kerja}} \quad (2.11)$$

Keterangan :

T_C = Waktu siklus detik/ m^3
 P = Produktivitas alat m^3/jam
 C = satuan (misal: 1 unit matras persiklus)

T_{durasi} = waktu yang diperlukan excavator

3. Produktivitas Dum Truck

- Waktu tenpuh isi (menit)

$$\frac{D}{S_{isi}} \times 60 = \quad (2.12)$$

- Waktu tempuh kosong

$$\frac{D}{S_{kosong}} \times 60 = \quad (2.13)$$

- Total Waktu siklus perjalanan

$$T_{siklus} = t_{isi} + t_{kosong} \quad (2.14)$$

- Kapasitas Angkut Per siklus

$$Q = \frac{p_{excavator} \times \text{Kapasitas Truck}}{60} \quad (2.15)$$

- Kebutuhan Treuk

$$\frac{T_{siklus}}{Q} = \quad (2.16)$$

Keterangan :

D = Jarak satu arah quarry (km/jam)

S_{isi} = Kecepatan saat penuh (km/jam)

S_{kosong} = Kecepatan saat kosong (km/jam)

T_{siklus} = total waktu siklus perjalanan (jam)

Q = Kapasitas angkut per siklus (m^3/jam)

$p_{excavator}$ = Produktivitas excavator (m^3/jam)

2.12. Simulasi Monte Carlo

2.12.1. Pengertian Simulasi Monte Carlo

Metode Monte Carlo merupakan suatu pendekatan kuantitatif berbasis simulasi yang memanfaatkan bilangan acak (*random numbers*) dan distribusi probabilitas untuk memodelkan serta menganalisis perilaku sistem yang mengandung ketidakpastian. Dalam penerapannya, setiap variabel yang tidak pasti seperti durasi aktivitas atau produktivitas alat direpresentasikan dalam bentuk distribusi probabilitas tertentu, misalnya distribusi optimis, paling mungkin, dan pesimis. Selanjutnya, simulasi dilakukan melalui proses pengulangan (*iteration*) dalam jumlah besar untuk menghasilkan berbagai kemungkinan hasil.

Berbeda dengan metode deterministik yang hanya menghasilkan satu nilai estimasi, metode Monte Carlo tidak bertujuan mencari satu “jawaban pasti”, melainkan menyajikan gambaran probabilistik dari berbagai kemungkinan hasil beserta tingkat kemungkinannya. Dengan demikian, metode ini mampu menunjukkan peluang terjadinya percepatan maupun

keterlambatan proyek secara lebih realistis. Oleh karena itu, simulasi Monte Carlo sangat sesuai digunakan dalam analisis risiko penjadwalan dan biaya proyek, khususnya pada proyek konstruksi yang memiliki tingkat ketidakpastian tinggi akibat faktor eksternal seperti kondisi cuaca (Aldiyan Rizky 2022).

2.12.2. Hakikat dan Tujuan *Monte Carlo*

Metode *Monte Carlo* didasarkan pada fakta bahwa banyak permasalahan dalam manajemen proyek, seperti durasi pekerjaan, biaya pelaksanaan, dan produktivitas alat, tidak dapat dinyatakan secara tepat dengan satu nilai tunggal. Hal ini karena setiap kegiatan proyek selalu mengandung variasi dan ketidakpastian yang dapat berubah selama pelaksanaan. Pendekatan deterministik yang hanya menggunakan satu nilai estimasi sering kali kurang mampu menggambarkan kondisi nyata proyek secara menyeluruh.

Oleh karena itu, metode *Monte Carlo* tidak memaksakan satu nilai pasti, melainkan memanfaatkan ketidakpastian tersebut dengan cara melakukan simulasi terhadap sejumlah besar skenario acak. Setiap skenario dibangun berdasarkan distribusi probabilitas dari variabel input yang telah ditetapkan, sehingga menghasilkan sekumpulan keluaran yang membentuk suatu distribusi hasil. Distribusi ini mencerminkan secara lebih komprehensif tingkat risiko dan peluang yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek (Project Management Academy 2023).

Secara umum, tujuan utama penerapan metode *Monte Carlo* adalah sebagai berikut:

1. Mengukur dan mengevaluasi pengaruh ketidakpastian variabel input terhadap keluaran (*output*) sistem, sehingga hubungan antara risiko dan kinerja proyek dapat dianalisis secara kuantitatif.
2. Menghasilkan indikator probabilistik yang mendukung pengambilan keputusan, seperti peluang proyek dapat diselesaikan sebelum tanggal tertentu, probabilitas terjadinya pembengkakan biaya di atas anggaran yang direncanakan, serta kisaran nilai durasi atau biaya yang paling mungkin terjadi berdasarkan tingkat keyakinan tertentu.

2.12.3. *Triangular Distribution*

Distribusi segitiga (*triangular distribution*) merupakan salah satu distribusi probabilitas kontinu yang didefinisikan oleh tiga parameter utama, yaitu nilai minimum (*a*), nilai paling mungkin (*most likely*), (*m*), dan nilai maksimum (*b*). Distribusi ini banyak digunakan dalam analisis proyek konstruksi karena bersifat sederhana, mudah dipahami, serta sesuai diterapkan pada kondisi di mana data historis terbatas namun estimasi dari pakar atau pengalaman lapangan tersedia.

Dalam konteks estimasi tiga titik (*three-point estimation*), ketiga parameter tersebut membentuk suatu distribusi berbentuk segitiga, di mana nilai *most likely* memiliki probabilitas tertinggi dibandingkan nilai lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *most likely* dianggap sebagai kondisi yang paling realistis untuk terjadi. Sebaliknya, nilai yang mendekati batas minimum (*a*) dan maksimum (*b*) memiliki peluang kejadian yang lebih kecil karena mewakili kondisi optimis dan pesimis yang jarang terjadi.

Penggunaan distribusi segitiga dalam simulasi Monte Carlo memungkinkan hasil simulasi tidak hanya berupa satu nilai rata-rata, tetapi juga berupa sebaran probabilitas dari berbagai kemungkinan nilai. Dengan demikian, keluaran (*output*) simulasi cenderung

terkonsentrasi di sekitar nilai *most likely*, sehingga memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap ketidakpastian durasi atau biaya proyek dibandingkan dengan pendekatan deterministik.

2.12.4. Langkah-Langkah Simulasi Monte Carlo

1. Menentukan Variabel (Input)

Langkah pertama adalah menentukan variabel yang akan disimulasikan, yaitu durasi proyek (X), dalam Konteks ini, durasi proyek memiliki tiga parameter utama yang mencerminkan ketidakpastian waktu penyelesaian, yaitu:

- Durasi optimis (a)
- Durasi paling mungkin (m)
- Durasi pesimis (b)

2. Menghasilkan Bilangan Acak

Setiap simulasi memerlukan bilangan acak yang mewakili kemungkinan realisasi dari durasi proyek, bilangan acak tersebut memiliki rentang nilai antara 0 hingga 1, dan dapat diperoleh menggunakan fungsi acak seperti RAND() pada microsoft Excel (Hamali 2017) :

$$r = \text{RAND} (), \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (2.17)$$

Bilangan acak ini akan menjadi dasar untuk menentukan hasil durasi simulasi proyek pada setiap iterasi

3. Mengubah Bilangan acak menjadi durasi simulasi (Iterasi)

Nilai bilangan acak yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi durasi simulasi (X) menggunakan rumus distribusi segitiga (Triangular Distribution) (Forbes, C., M. Evans, N. Hastings 2011):

$$X = \alpha + \sqrt{r \times (b - \alpha) \times (m - \alpha)} \quad \text{jika } r < \frac{m - \alpha}{b - \alpha} \quad (2.18)$$

$$X = b - \sqrt{(1 - r) \times (b - \alpha) \times (b - m)} \quad \text{jika } r \geq \frac{m - \alpha}{b - \alpha} \quad (2.19)$$

Keterangan :

- α = durasi optimis (hari tercepat)
- m = durasi paling mungkin
- b = durasi pesimis
- r = bilangan acak antara 0 dan 1

4. Melakukan Simulasi berulang (Iterasi)

Simulasi dilakukan secara berulang sebanyak N kali (misalnya 1.000 iterasi) untuk memperoleh berbagai kemungkinan durasi proyek, setiap hasil simulasi dicatat sebagai satu kemungkinan waktu penyelesaian proyek.

5. Mengelompokkan Hasil simulasi

Hasil simulasi Monte Carlo yang diperoleh dari proses iterasi sebanyak N kali (dalam skripsi ini sebanyak 1.000 iterasi) berupa data durasi penyelesaian proyek kemudian dikelompokkan untuk menentukan probabilitas penyelesaian proyek pada durasi tertentu. Setiap hasil iterasi dianggap sebagai satu kemungkinan durasi penyelesaian proyek yang dapat terjadi.

Pengelompokan dilakukan dengan menghitung jumlah hasil simulasi yang memiliki durasi penyelesaian lebih kecil atau sama dengan durasi target yang telah ditentukan, kemudian dibandingkan dengan jumlah total iterasi simulasi. Dengan demikian, probabilitas penyelesaian proyek pada durasi tertentu dapat ditentukan secara kuantitatif.

Probabilitas penyelesaian proyek pada durasi target T_d dirumuskan sebagai berikut (Dwi Putra, I. M. A., & Wirahadikusuma 2018):

$$P(T \leq T_d) = \frac{n(T \leq T_d)}{N} \quad (2.20)$$

Keterangan :

- $P(T \leq T_d)$ = probabilitas proyek selesai pada atau sebelum durasi target
- $n(T \leq T_d)$ = jumlah hasil simulasi dengan durasi
- N = jumlah total iterasi simulasi

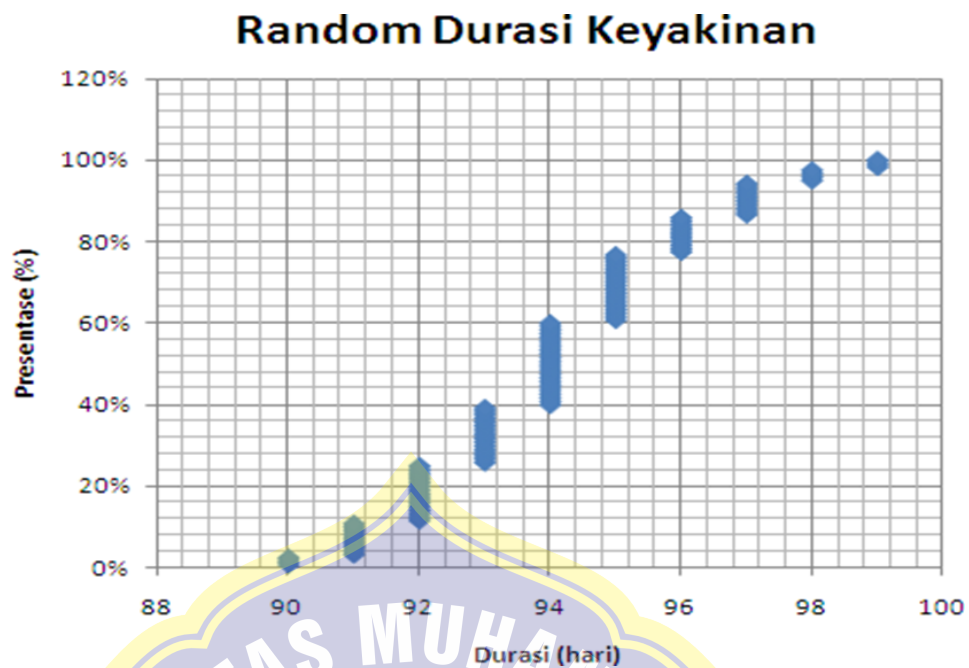
6. Membuat Grafik Durasi Keyakinan Simulasi Monte Carlo

Grafik durasi keyakinan (confidence duration chart) merupakan salah satu bentuk visualisasi yang digunakan dalam analisis risiko penjadwalan proyek dengan metode simulasi Monte Carlo. Grafik ini menggambarkan hubungan antara durasi proyek dengan tingkat probabilitas atau tingkat keyakinan bahwa proyek dapat diselesaikan pada atau sebelum durasi tertentu. Dengan kata lain, grafik ini menyajikan hasil dalam bentuk kurva kumulatif yang menunjukkan kecenderungan waktu penyelesaian yang mungkin terjadi berdasarkan ribuan iterasi simulasi.

Penggunaan grafik durasi keyakinan dalam kajian manajemen proyek sangat penting karena memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai ketidakpastian durasi. Berbeda dengan pendekatan deterministik yang hanya menghasilkan satu nilai durasi tunggal, grafik ini menunjukkan rentang kemungkinan hasil dan probabilitas masing-masing durasi. Hal tersebut memungkinkan manajer proyek untuk mengidentifikasi durasi yang bersifat optimistis, realistis, maupun konservatif.

Selain itu, grafik durasi keyakinan membantu dalam proses pengambilan keputusan yang berbasis risiko (risk-based scheduling). Melalui grafik ini, pihak manajemen dapat menentukan tingkat keyakinan tertentu misalnya pada tingkat probabilitas menengah atau tinggi sebagai dasar penetapan target durasi proyek

Berikut merupakan contoh diagram yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antara durasi proyek dan tingkat keyakinan dalam simulasi Monte Carlo



Gambar 2.10 Grafik Durasi Keyakinan
Sumber : Maulidya Octaviani Bustamin, 2015

2.13. Peneliti Terdahulu

Berdasarkan hasil analisis (Dony. K. 2021), pada jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, Vol.698 No.1 (2021), dengan judul “Monte Carlo Simulation for Reliability Hydraulic Stability of Rubble Mound Breakwater Armour at Sudimoro Power Plant, Pacitan”. Berdasarkan hasil analisis Skripsi ini menyimpulkan bahwa penerapan metode Simulasi Monte Carlo dapat digunakan secara efektif untuk menghitung tingkat keandalan (reliability) stabilitas hidrolik struktur breakwater. Dengan menggunakan parameter desain dari formula Hudson dan Van der Meer, hasil simulasi menunjukkan bahwa breakwater pada lokasi studi memiliki tingkat keandalan tinggi, yakni di atas 95% hingga 98%. Hal ini membuktikan bahwa metode probabilistik mampu memberikan gambaran yang lebih realistis terkait performa struktur dibandingkan perhitungan deterministik semata. Selain itu, simulasi Monte Carlo memungkinkan identifikasi potensi kegagalan pada kondisi ekstrim, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi desain dan perencanaan pemeliharaan.

Berdasarkan hasil skripsi (Suryasa Rizal Agung 2021), dengan judul “Analisis durasi proyek pada pekerjaan rekonstruksi apron B di terminal 2 Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya dengan menggunakan simulasi Monte carlo” Pada skripsi Universitas Muhammadiyah Surabaya pada skripsi ini Simulasi Monte Carlo menggunakan empat data utama, yaitu durasi optimis, durasi paling mungkin, durasi pesimis setiap pekerjaan, serta hubungan antarpekerjaan yang diperoleh melalui survei dan wawancara dengan kontraktor pelaksana proyek PT Brantas Abipraya (Persero). Microsoft Project digunakan untuk menghitung total durasi proyek, sedangkan Crystal Ball digunakan untuk melakukan simulasi Monte Carlo dan menentukan probabilitas keberhasilan durasi proyek, hasil penelitian menunjukkan bahwa durasi proyek berdasarkan waktu optimis sebesar 261 hari memiliki probabilitas keberhasilan sangat rendah yaitu 1,83%. Sementara itu, durasi berdasarkan waktu

paling mungkin (285 hari), pesimis (290 hari), dan hasil simulasi (273 hari) masing-masing memiliki probabilitas keberhasilan sebesar 98,45%, 99,94%, dan 50,49%. Berdasarkan simulasi Monte Carlo, durasi proyek dengan tingkat keberhasilan 100% adalah 294 hari, sehingga durasi ini dianggap sebagai durasi paling aman untuk pelaksanaan proyek.

Berdasarkan skripsi yang dilakukan oleh (Debataraja 2025) dalam Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Vol. 23 No. 2, pelaksanaan proyek konstruksi gedung sangat dipengaruhi oleh efektivitas manajemen rantai pasok material. Melalui pemodelan simulasi Monte Carlo, skripsi tersebut menganalisis risiko keterlambatan pasokan material dari faktor internal (supply, control, process, demand) maupun eksternal (disaster factor). Hasil analisis menunjukkan bahwa perkiraan keterlambatan material berkisar antara 2,25–5,70 hari untuk waktu minimum dan 15,19–32,98 hari untuk waktu maksimum. Adapun tiga risiko paling dominan yang menyebabkan keterlambatan adalah: (1) keterlambatan pembayaran kontraktor utama kepada subkontraktor, (2) waktu tunggu yang lama akibat pengiriman material secara bertahap, dan (3) kendala pada proses pabrik serta keterbatasan material dari pemasok. Material yang paling rentan terhadap keterlambatan yaitu beton pracetak (41,60%), baja (34,90%), dan besi (33,40%). Peneliti merekomendasikan strategi mitigasi berupa komitmen pembayaran tepat waktu kepada subkontraktor, perencanaan pengadaan material yang matang, serta diversifikasi pemasok untuk menekan risiko keterlambatan dalam rantai pasok konstruksi (Debataraja et al., 2025).

