

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Manajemen Proyek Konstruksi

Manajemen proyek konstruksi adalah suatu proses penerapan ilmu pengetahuan, keahlian, serta keterampilan teknis untuk merencanakan, melaksanakan, dan mengendalikan suatu pembangunan dari awal hingga akhir. Tujuan utamanya adalah untuk memastikan bahwa seluruh sumber daya proyek, seperti tenaga kerja, material, dan peralatan, dapat dikelola secara efektif dan efisien mungkin guna mencapai target penyelesaian yang telah disepakati bersama (Soeharto, 1997).

Salah satu konsep fundamental dalam manajemen proyek adalah *triple constraint*, yaitu tiga batasan utama yang saling berkaitan dan mempengaruhi keberhasilan proyek, meliputi waktu (*time*), biaya (*cost*), dan mutu (*quality*) (Wicaksono, 2024). Ketiga aspek tersebut tidak dapat dipisahkan, di mana perubahan pada salah satu aspek akan berdampak langsung terhadap aspek lainnya. Misalnya, percepatan waktu penyelesaian proyek umumnya akan menyebabkan peningkatan biaya, sedangkan penurunan biaya dapat berpengaruh terhadap mutu pekerjaan yang dihasilkan.

Dalam pelaksanaan proyek konstruksi, aspek waktu menjadi sangat penting karena keterlambatan dapat menimbulkan berbagai konsekuensi, seperti meningkatnya biaya tidak langsung (*indirect cost*), potensi denda keterlambatan (*liquidated damages*), serta terganggunya fungsi proyek bagi pengguna. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendalian waktu yang baik melalui penyusunan jadwal proyek yang realistis dan terukur.

Selain itu, pengendalian biaya juga menjadi faktor krusial dalam manajemen proyek konstruksi. Biaya proyek terdiri atas biaya langsung (*direct cost*) yang berkaitan langsung dengan aktivitas konstruksi, serta biaya tidak langsung (*indirect cost*) yang bersifat *overhead* selama proyek berlangsung. Hubungan antara waktu dan

biaya ini bersifat dinamis, di mana semakin lama durasi proyek, maka biaya tidak langsung akan semakin meningkat.

Dengan demikian, manajemen proyek konstruksi tidak hanya bertujuan untuk menyelesaikan pekerjaan sesuai dengan spesifikasi teknis, tetapi juga untuk mengoptimalkan keseimbangan antara waktu dan biaya. Dalam penelitian ini, konsep manajemen proyek konstruksi menjadi landasan utama dalam menganalisis keterlambatan proyek serta merumuskan strategi percepatan menggunakan metode *Time Cost Trade-Off* (TCTO) guna memperoleh kombinasi durasi dan biaya yang paling optimal.

3.2 Manajemen Waktu Proyek

Manajemen waktu proyek merupakan salah satu aspek penting dalam manajemen proyek konstruksi yang berfokus pada perencanaan, penyusunan jadwal, serta pengendalian durasi kegiatan agar proyek dapat diselesaikan tepat waktu sesuai dengan target yang telah ditetapkan. Pengelolaan waktu yang efektif sangat diperlukan untuk menghindari keterlambatan yang dapat berdampak pada peningkatan biaya dan terganggunya kinerja proyek secara keseluruhan (Soeharto, 1997).

Menurut Soeharto (1997), manajemen waktu proyek mencakup serangkaian proses yang meliputi identifikasi aktivitas, penentuan urutan pekerjaan, estimasi durasi, penyusunan jadwal, serta pengendalian terhadap pelaksanaan proyek. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh aktivitas proyek dapat berjalan secara terkoordinasi dan efisien. Sejalan dengan itu, Kerzner (2017) menyatakan bahwa penjadwalan proyek merupakan bagian integral dari manajemen proyek yang berfungsi untuk mengalokasikan waktu secara optimal terhadap seluruh kegiatan proyek.

Salah satu langkah utama dalam manajemen waktu proyek adalah penyusunan jadwal pelaksanaan (*time schedule*). Jadwal proyek berfungsi sebagai pedoman dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan serta sebagai alat pengendalian untuk memantau kemajuan proyek. Beberapa bentuk penyajian jadwal yang umum

digunakan dalam proyek konstruksi antara lain adalah *Bar Chart (Gantt Chart)* dan Kurva-S. *Bar Chart* digunakan untuk menggambarkan durasi dan urutan aktivitas secara sederhana, sedangkan Kurva-S menunjukkan hubungan kumulatif antara waktu dan progres pekerjaan dalam bentuk persentase (Newitt, 2009).

Dalam penyusunan jadwal proyek, setiap aktivitas harus memiliki durasi yang jelas dan hubungan ketergantungan (*dependency*) dengan aktivitas lainnya. Ketergantungan ini menunjukkan urutan logis pelaksanaan pekerjaan, sehingga dapat diketahui aktivitas mana yang harus diselesaikan terlebih dahulu sebelum aktivitas berikutnya dapat dimulai. Hubungan ketergantungan ini menjadi dasar dalam penyusunan jaringan kerja proyek (*network planning*) yang lebih kompleks (Kerzner, 2017).

Selain itu, manajemen waktu proyek juga melibatkan proses pengendalian jadwal (*schedule control*), yaitu kegiatan membandingkan antara jadwal rencana dengan realisasi di lapangan. Apabila terjadi deviasi atau keterlambatan, maka diperlukan tindakan korektif seperti percepatan pekerjaan (*crashing*) atau penyesuaian metode pelaksanaan agar proyek tetap dapat diselesaikan sesuai target yang diinginkan (Soeharto, 1997).

Dalam konteks penelitian ini, manajemen waktu proyek digunakan sebagai dasar dalam penyusunan dan analisis jadwal pelaksanaan proyek konstruksi. Data *Time Schedule* yang diperoleh dari dokumen proyek akan dimodelkan untuk mengidentifikasi hubungan antar aktivitas serta menentukan durasi total proyek. Selanjutnya, hasil analisis ini akan digunakan untuk mengidentifikasi lintasan kritis sebagai dasar dalam penerapan metode percepatan menggunakan *Time Cost Trade-Off (TCTO)*.

3.3 Jaringan Kerja Proyek

Jaringan kerja proyek (*network planning*) merupakan suatu metode yang digunakan untuk menggambarkan urutan dan hubungan ketergantungan antar aktivitas dalam suatu proyek secara sistematis dan logis. Metode ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai alur pelaksanaan proyek, sehingga memudahkan

dalam proses perencanaan, penjadwalan, serta pengendalian waktu proyek (Soeharto, 1997).

Menurut Kerzner (2017), jaringan kerja proyek merupakan representasi visual dari aktivitas proyek yang disusun berdasarkan hubungan logis antar pekerjaan, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi urutan pelaksanaan serta aktivitas yang memiliki pengaruh signifikan terhadap durasi total proyek. Dengan menggunakan jaringan kerja, manajer proyek dapat mengetahui aktivitas mana yang harus diprioritaskan serta potensi keterlambatan yang mungkin terjadi.

Salah satu metode yang umum digunakan dalam penyusunan jaringan kerja proyek adalah *Precedence Diagram Method* (PDM). Metode ini adalah salah satu metode penyusunan jaringan kerja yang paling sering digunakan, di mana setiap kegiatan atau aktivitas proyek digambarkan dalam bentuk kotak (*node*), sedangkan anak panah digunakan untuk menunjukkan alur hubungan ketergantungan antar aktivitas tersebut (Newitt, 2009). PDM banyak digunakan dalam perangkat lunak penjadwalan modern seperti *Microsoft Project* karena fleksibilitasnya dalam menggambarkan berbagai jenis hubungan aktivitas.

Dalam metode PDM, terdapat beberapa jenis hubungan ketergantungan (*relationship*) antar aktivitas, yaitu sebagai berikut:

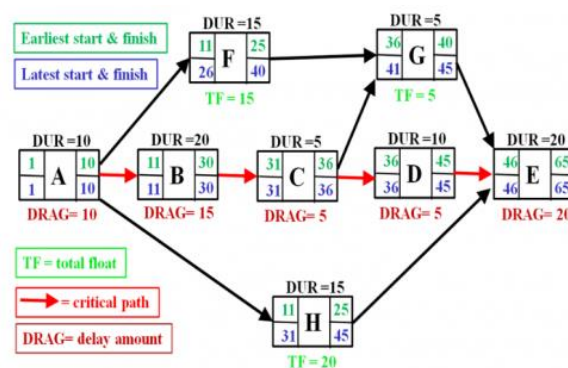
1. *Finish to Start* (FS): Aktivitas berikutnya hanya dapat dimulai setelah aktivitas sebelumnya selesai. Hubungan ini merupakan jenis yang paling umum digunakan dalam proyek konstruksi.
2. *Start to Start* (SS): Aktivitas berikutnya dapat dimulai setelah aktivitas sebelumnya dimulai, tanpa harus menunggu aktivitas tersebut selesai.
3. *Finish to Finish* (FF): Aktivitas berikutnya hanya dapat diselesaikan setelah aktivitas sebelumnya selesai.
4. *Start to Finish* (SF): Aktivitas berikutnya hanya dapat diselesaikan setelah aktivitas sebelumnya dimulai. Hubungan ini jarang digunakan dalam praktik konstruksi.

Selain itu, dalam jaringan kerja proyek juga dikenal adanya konsep *lead* dan *lag*. *Lead* merupakan percepatan waktu antar aktivitas, sedangkan *lag* merupakan waktu tunggu yang harus dipenuhi sebelum aktivitas berikutnya dapat dimulai. Penggunaan *lead* dan *lag* memungkinkan penyusunan jadwal yang lebih realistis sesuai dengan kondisi lapangan (Kerzner, 2017).

Dengan adanya jaringan kerja proyek, analisis terhadap durasi total proyek menjadi lebih terstruktur, karena seluruh aktivitas telah disusun berdasarkan hubungan ketergantungan yang jelas. Hal ini menjadi dasar penting dalam penerapan metode *Critical Path Method* (CPM) untuk menentukan lintasan kritis proyek.

3.4 Critical Path Method (CPM)

Critical Path Method (CPM) merupakan salah satu metode dalam manajemen proyek yang digunakan untuk merencanakan, menganalisis, dan mengendalikan jadwal proyek dengan cara mengidentifikasi rangkaian aktivitas yang menentukan durasi total proyek. Metode ini memungkinkan peneliti atau manajer proyek untuk mengetahui aktivitas-aktivitas yang bersifat kritis, yaitu aktivitas yang tidak memiliki kelonggaran waktu (*float*) sehingga keterlambatan pada aktivitas tersebut akan langsung menyebabkan keterlambatan pada keseluruhan proyek (Soeharto, 1997).



Gambar 3. 1 Critical Path Method Diagram

Dalam metode CPM, analisis dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu *forward pass* dan *backward pass*. Kedua tahapan ini digunakan untuk menghitung parameter waktu pada setiap aktivitas, yang meliputi:

1. *Forward Pass* (Perhitungan Maju)

Forward pass digunakan untuk menentukan waktu paling awal suatu aktivitas dapat dimulai dan diselesaikan, yang meliputi:

- a. *Early Start* (ES): waktu paling awal suatu aktivitas dapat dimulai.
- b. *Early Finish* (EF): waktu paling awal suatu aktivitas dapat diselesaikan

Hubungan antara ES dan EF dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$EF = ES + t \dots\dots\dots (3.1)$$

Di mana:

EF = *Early Finish* (Waktu Selesai Paling Awal)

ES = *Early Start* (Waktu Mulai Paling Awal)

t = Durasi aktivitas

2. *Backward Pass* (Perhitungan Mundur)

Backward pass digunakan untuk menentukan waktu paling akhir suatu aktivitas dapat dimulai dan diselesaikan tanpa menyebabkan keterlambatan proyek, yang meliputi:

- *Late Finish* (LF): waktu paling akhir aktivitas dapat diselesaikan
- *Late Start* (LS): waktu paling akhir aktivitas dapat dimulai

Hubungan antara LS dan LF dirumuskan sebagai berikut:

$$LS = LF - t \dots\dots\dots (3.2)$$

Di mana:

LS = *Late Start* (Waktu Mulai Paling Lambat)

LF = *Late Finish* (Waktu Selesai Paling Lambat)

t = Durasi aktivitas

3. Total float (TF)

Total Float merupakan waktu kelonggaran yang dimiliki suatu aktivitas tanpa mempengaruhi durasi total proyek. Aktivitas dengan nilai total *float* sama dengan nol (TF = 0) dikategorikan sebagai aktivitas kritis. Rumus *Total Float* adalah sebagai berikut:

$$TF = LS - ES \dots\dots\dots (3.3)$$

Atau

$$TF = LF - EF \dots\dots\dots (3.4)$$

4. Lintasan Kritis (*Critical Path*)

Dalam analisis CPM, suatu pekerjaan dinyatakan sebagai pekerjaan kritis dan masuk ke dalam Lintasan Kritis (*Critical Path*) apabila tidak memiliki waktu longgar sama sekali, atau nilai *Total Float* sama dengan nol ($TF = 0$).

Pada praktiknya di proyek konstruksi yang modern, perhitungan parameter CPM (mulai dari *Forward Pass*, *Backward Pass*, hingga identifikasi *Total Float*) dilakukan secara otomatis menggunakan bantuan instrumen perangkat lunak seperti *Microsoft Project*.

3.5 Biaya Proyek Konstruksi

Biaya proyek konstruksi merupakan seluruh pengeluaran yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proyek sesuai dengan ruang lingkup pekerjaan yang telah ditetapkan. Pengelolaan biaya menjadi salah satu aspek penting dalam manajemen proyek karena berkaitan langsung dengan efisiensi penggunaan sumber daya serta keuntungan yang diperoleh dari pelaksanaan proyek (Soeharto, 1997).

Menurut Kerzner (2017), biaya proyek adalah total sumber daya finansial yang digunakan dalam pelaksanaan proyek, mulai dari tahap perencanaan hingga penyelesaian. Dalam proyek konstruksi, biaya tidak hanya dipengaruhi oleh volume pekerjaan, tetapi juga oleh durasi pelaksanaan proyek. Semakin lama durasi proyek, maka semakin besar biaya yang harus dikeluarkan, terutama pada komponen biaya tidak langsung.

Secara umum, biaya proyek konstruksi dapat dibagi menjadi dua komponen utama, yaitu biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*).

3.5.1 Biaya Langsung (*Direct Cost*)

Biaya langsung adalah biaya yang berkaitan langsung dengan pelaksanaan pekerjaan konstruksi di lapangan. Biaya ini dapat diidentifikasi secara jelas pada setiap item pekerjaan dalam Rencana Anggaran Biaya (RAB). Komponen biaya langsung meliputi:

1. Biaya tenaga kerja
2. Biaya material
3. Biaya peralatan

Biaya langsung bersifat proporsional terhadap volume pekerjaan, sehingga perubahan pada metode pelaksanaan atau percepatan pekerjaan akan berpengaruh langsung terhadap besarnya biaya ini (Newitt, 2009).

3.5.2 Biaya Tidak Langsung (*Indirect cost*)

Biaya tidak langsung adalah biaya yang tidak berkaitan langsung dengan item pekerjaan tertentu, tetapi tetap diperlukan selama proyek berlangsung. Biaya ini umumnya bersifat tetap per satuan waktu (harian atau bulanan), sehingga sangat dipengaruhi oleh lamanya durasi proyek.

Komponen biaya tidak langsung meliputi:

1. Biaya *overhead* proyek (kantor lapangan, listrik, air)
2. Gaji staf manajemen proyek
3. Biaya administrasi dan pengawasan
4. Sewa fasilitas sementara

Menurut Soeharto (1997), biaya tidak langsung akan terus bertambah seiring bertambahnya durasi proyek, sehingga keterlambatan pelaksanaan proyek dapat menyebabkan pembengkakan biaya yang signifikan.

3.5.3 Hubungan Waktu dan Biaya Proyek

Dalam proyek konstruksi, terdapat hubungan yang erat antara waktu dan biaya. Secara umum:

1. Jika waktu pelaksanaan diperpendek atau dipercepat dari jadwal normalnya, maka Biaya Langsung (*Direct Cost*) akan bergerak naik (bertambah mahal) akibat adanya tambahan biaya lembur pekerja atau sewa alat pendukung.
2. Namun sebaliknya, pemendekan durasi tersebut akan membuat pengeluaran Biaya Tidak Langsung (*Indirect cost*) bergerak turun (menjadi lebih murah) karena masa operasional lapangan dan biaya sewa harian menjadi lebih singkat.

Hubungan ini menunjukkan adanya *trade-off* antara waktu dan biaya, di mana pengurangan durasi proyek melalui percepatan (*crashing*) akan meningkatkan biaya langsung, tetapi dapat mengurangi biaya tidak langsung. Sebaliknya, jika proyek mengalami keterlambatan, maka biaya tidak langsung akan meningkat meskipun biaya langsung relatif tetap (Kerzner, 2017).

3.5.4 Biaya Total Proyek

Biaya total proyek merupakan penjumlahan antara biaya langsung dan biaya tidak langsung, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$TC = DC + IC \dots\dots\dots (3.5)$$

Di mana:

TC = *Total Cost* (biaya total proyek)

DC = *Direct Cost* (biaya langsung)

IC = *Indirect cost* (biaya tidak langsung)

3.6 Produktivitas Tenaga Kerja

Produktivitas tenaga kerja merupakan salah satu faktor penting dalam pelaksanaan proyek konstruksi yang berpengaruh langsung terhadap durasi dan biaya pekerjaan. Produktivitas umumnya didefinisikan sebagai perbandingan antara *output* yang dihasilkan dengan *input* yang digunakan dalam suatu periode waktu tertentu. Dalam konteks konstruksi, produktivitas tenaga kerja menunjukkan kemampuan pekerja dalam menyelesaikan volume pekerjaan dalam satu satuan waktu (Soeharto, 1997).

Menurut Peurifoy et al. (2018), produktivitas tenaga kerja dalam proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat teknis maupun non-teknis, seperti keterampilan pekerja, kondisi lingkungan kerja, metode pelaksanaan, ketersediaan material, serta manajemen proyek secara keseluruhan. Oleh karena itu, produktivitas tidak bersifat konstan dan dapat berubah tergantung pada kondisi pelaksanaan di lapangan.

Secara umum, produktivitas tenaga kerja dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$P = \frac{\text{Output}}{t} \dots\dots\dots (3.6)$$

Di mana:

P = Produktivitas

t = Durasi

Output = Volume pekerjaan

Dalam perencanaan proyek konstruksi, produktivitas tenaga kerja biasanya diasumsikan dalam kondisi normal, yaitu pada jam kerja standar tanpa adanya tekanan waktu atau tambahan beban kerja. Nilai produktivitas ini umumnya diperoleh dari Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) yang telah menjadi standar. Namun, dalam kondisi tertentu seperti percepatan proyek melalui penambahan jam kerja lembur, asumsi produktivitas normal ini tidak lagi berlaku secara penuh.

Penambahan jam kerja lembur sering digunakan sebagai salah satu strategi percepatan proyek (*crashing*). Meskipun secara teoretis penambahan jam kerja dapat meningkatkan *output* harian, namun dalam praktiknya produktivitas tenaga kerja pada jam lembur cenderung mengalami penurunan dibandingkan dengan jam kerja normal. Hal ini disebabkan oleh faktor kelelahan fisik dan mental pekerja yang dapat menurunkan efektivitas kerja (Kerzner, 2017).

3.7 Kelelahan Pekerja (*Fatigue Factor*)

Kelelahan pekerja (*fatigue*) merupakan kondisi menurunnya kemampuan fisik dan mental tenaga kerja akibat aktivitas kerja yang berlangsung secara terus-menerus dalam jangka waktu tertentu. Dalam proyek konstruksi, kelelahan menjadi faktor penting yang dapat mempengaruhi produktivitas tenaga kerja, terutama ketika diterapkan sistem kerja lembur sebagai upaya percepatan proyek (Soeharto, 1997).

Menurut Peurifoy et al. (2018), kelelahan kerja dapat menyebabkan penurunan efisiensi, meningkatnya risiko kesalahan kerja, serta berkurangnya konsentrasi pekerja di lapangan. Kondisi ini secara langsung berdampak pada penurunan produktivitas, sehingga tambahan jam kerja tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan *output* pekerjaan.

Dalam praktik percepatan proyek (*crashing*), penambahan jam kerja lembur sering diasumsikan dapat meningkatkan produktivitas total harian. Namun, asumsi tersebut tidak sepenuhnya akurat karena produktivitas tenaga kerja pada jam lembur cenderung lebih rendah dibandingkan dengan produktivitas pada jam kerja normal. Hal ini disebabkan oleh akumulasi kelelahan fisik yang dialami pekerja setelah bekerja dalam durasi normal (Kerzner, 2017).

Untuk mengakomodasi kondisi tersebut, digunakan konsep *fatigue factor*, yaitu suatu koefisien yang digunakan untuk merepresentasikan tingkat penurunan produktivitas tenaga kerja pada jam kerja lembur. Menurut Soeharto (1997) Produktivitas pekerja menurun berdasarkan semakin lamanya jam lembur. Penurunan ini berdampak pada berkurangnya prestasi kerja, yang umumnya ditandai dengan penurunan indeks produktivitas sekitar 0,1 per jam.

Berikut adalah tabel koefisien penurunan produktivitas berdasarkan Soeharto (1997):

Tabel 3. 1 koefisien Penurunan Produktivitas (*Fatigue factor*)

Jam Lembur	Penurunan indeks Produktivitas	Prestasi Kerja (%)
1 Jam	0.1	90
2 Jam	0.2	80
3 Jam	0.3	70
4 Jam	0.4	60

Secara umum, hubungan antara produktivitas normal dan produktivitas lembur dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{lembur} = P_{normal} * K_f \dots\dots\dots (3. 7)$$

Di mana:

K_f = *Fatigue Factor* (Faktor Kelelahan)

Penerapan *fatigue factor* dalam analisis proyek konstruksi memberikan pendekatan yang lebih realistis dibandingkan dengan asumsi produktivitas konstan. Tanpa mempertimbangkan faktor kelelahan, hasil analisis percepatan berpotensi

menghasilkan estimasi durasi yang terlalu optimistis serta biaya yang tidak mencerminkan kondisi sebenarnya di lapangan.

3.8 Regulasi Jam Kerja dan Upah Lembur

Dalam proyek konstruksi, pengaturan jam kerja dan lembur harus mengikuti peraturan perundang-undangan di Indonesia, yaitu Peraturan Pemerintah Nomor 35 Tahun 2021 tentang Waktu Kerja dan Waktu Istirahat. Regulasi ini menjadi dasar hukum untuk memastikan strategi percepatan proyek tetap aman dan memperhatikan kesejahteraan pekerja.

Pasal 26 ayat (1) peraturan tersebut menetapkan bahwa waktu kerja lembur paling banyak 4 jam dalam satu hari dan 18 jam dalam satu minggu. Ketentuan ini tidak berlaku untuk lembur yang dilakukan pada hari istirahat mingguan atau hari libur resmi.

PP No. 35 Tahun 2021 juga mengatur standar perhitungan upah lembur. Sesuai Pasal 31 ayat (1), ketentuannya adalah sebagai berikut:

1. Untuk jam kerja lembur pertama, upah yang dibayarkan adalah sebesar 1,5 (satu koma lima) kali upah sejam.
2. Untuk setiap jam kerja lembur berikutnya, upah yang dibayarkan adalah sebesar 2 (dua) kali upah sejam.

Untuk memperjelas ketentuan tersebut, berikut adalah rinciannya dalam Tabel berikut:

Tabel 3. 2 Kenaikan Upah Lembur

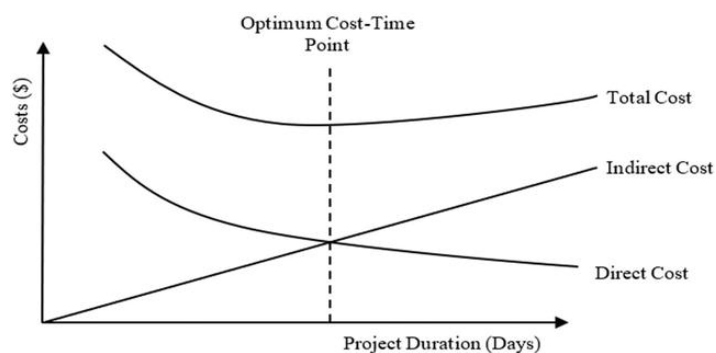
Jam lembur	Kenaikan Upah
1	1,5
2	2
3	2
4	2

Penelitian ini menggunakan ketentuan regulasi tersebut sebagai parameter utama dalam pemodelan optimasi *Time Cost Trade-Off* (TCTO). Batas maksimal 4 jam lembur per hari dijadikan sebagai kendala (*constraint*) dalam *Microsoft Excel*

Solver, sedangkan kelipatan upah lembur (1,5 dan 2 kali) digunakan untuk menghitung kenaikan biaya langsung. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh tidak hanya optimal secara matematis, tetapi juga realistis dan sesuai dengan regulasi ketenagakerjaan yang berlaku di Indonesia.

3.9 Time Cost Trade Off

Time Cost Trade-Off (TCTO) merupakan suatu metode dalam manajemen proyek yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara durasi pelaksanaan proyek dengan biaya yang diperlukan, dengan tujuan untuk memperoleh kombinasi waktu dan biaya yang paling optimal. Metode ini didasarkan pada konsep bahwa percepatan waktu penyelesaian proyek dapat dicapai dengan menambah sumber daya, namun hal tersebut akan berdampak pada peningkatan biaya langsung (Soeharto, 1997).



Gambar 3. 2 Grafik Optimum Cost-Time Point

3.9.1 Konsep Crashing

Crashing adalah proses pemampatan waktu proyek secara terencana dengan cara menambahkan sumber daya pada suatu aktivitas. Dalam praktiknya, penambahan sumber daya ini dapat berupa penambahan jumlah pekerja, penggunaan alat berat tambahan, atau penerapan jam kerja lembur. Hal yang perlu digarisbawahi dalam konsep *crashing* adalah bahwa percepatan hanya akan efektif memendekkan total waktu proyek jika diterapkan secara khusus pada pekerjaan-pekerjaan yang berada di lintasan kritis (*critical path*).

Konsep utama dalam TCTO adalah adanya dua kondisi durasi dan biaya pada setiap aktivitas, yaitu:

1. *Normal Duration* dan *Normal Cost*: Merupakan durasi dan biaya pelaksanaan aktivitas dalam kondisi standar tanpa adanya percepatan.
2. *Crash Duration* dan *Crash Cost*: Merupakan durasi tercepat yang dapat dicapai untuk suatu aktivitas dengan penambahan sumber daya, serta biaya yang diperlukan untuk mencapai durasi tersebut.

Kurva waktu dan biaya dalam TCTO umumnya menunjukkan bahwa ketika *Normal Duration* ditekan menjadi *Crash Duration*, maka grafik pengeluaran akan otomatis menanjak menuju titik *Crash Cost* yang lebih mahal. Hubungan antara waktu dan biaya dalam metode TCTO umumnya digambarkan dalam bentuk kurva waktu–biaya, di mana:

1. Pada durasi normal: biaya langsung rendah, biaya tidak langsung tinggi
2. Pada durasi dipercepat: biaya langsung meningkat, biaya tidak langsung menurun

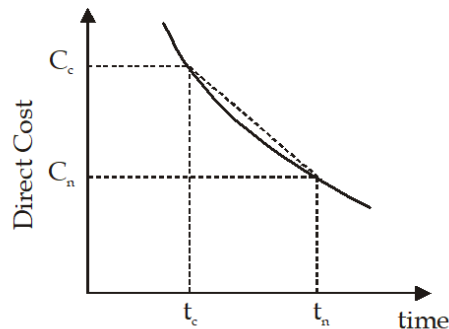
Titik optimal dalam analisis TCTO adalah kondisi di mana jumlah biaya langsung dan biaya tidak langsung mencapai nilai minimum.

Dalam pelaksanaan metode TCTO, langkah-langkah umum yang dilakukan meliputi:

1. Mengidentifikasi lintasan kritis menggunakan metode CPM
2. Menentukan aktivitas yang dapat dipercepat
3. Menghitung perubahan durasi dan biaya akibat percepatan
4. Menentukan nilai *cost slope* sebagai dasar prioritas percepatan
5. Melakukan analisis untuk mendapatkan kombinasi durasi dan biaya yang optimal

3.10 Cost Slope (Kemiringan Biaya)

Cost Slope atau gradien kemiringan biaya adalah tingkat kenaikan biaya langsung (*direct cost*) per satuan waktu (misalnya per hari) apabila suatu pekerjaan dipercepat penyelesaiannya. Nilai *Cost Slope* berfungsi sebagai indikator harga percepatan.



Gambar 3. 3 Konsep *Cost Slope*

Secara matematis, rumusnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Cost Slope} = \frac{C_c - C_n}{t_n - t_c} \dots\dots\dots (3. 8)$$

di mana:

C_c = biaya aktivitas setelah percepatan

C_n = biaya aktivitas dalam kondisi normal

t_n = durasi aktivitas dalam kondisi normal

t_c = durasi tercepat aktivitas setelah percepatan

Nilai *cost slope* menunjukkan tambahan biaya yang harus dikeluarkan untuk mengurangi durasi aktivitas sebesar satu satuan waktu (misalnya per hari). Dengan demikian, *cost slope* menjadi indikator penting dalam pengambilan keputusan untuk menentukan kombinasi percepatan yang paling efisien.

Dalam penerapan metode TCTO, perhitungan *cost slope* dilakukan untuk setiap aktivitas yang berada pada lintasan kritis. Hal ini dikarenakan hanya aktivitas kritis yang memiliki pengaruh langsung terhadap durasi total proyek. Aktivitas non-kritis tidak menjadi prioritas dalam proses percepatan karena masih memiliki kelonggaran waktu (*float*).

Namun demikian, dalam kondisi tertentu, percepatan aktivitas kritis dapat

menyebabkan perubahan lintasan kritis (*critical path shifting*), sehingga aktivitas yang sebelumnya tidak kritis dapat menjadi kritis. Oleh karena itu, *analisis cost slope* perlu dilakukan secara berulang-ulang seiring dengan perubahan jaringan kerja proyek (Kerzner, 2017)..

3.11 Microsoft Excel Solver

Microsoft Excel Solver merupakan fitur tambahan (*add-in*) pada perangkat lunak Microsoft Excel yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi dengan mencari nilai terbaik dari suatu fungsi tujuan (*objective function*) berdasarkan variabel keputusan (*decision variables*) dan kendala (*constraints*) yang telah ditentukan oleh pengguna. Solver banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti teknik, ekonomi, manajemen, dan penelitian operasional, karena mampu membantu proses pengambilan keputusan secara sistematis dan efisien (Taha, 2017).

Microsoft Excel Solver menyediakan tiga metode optimasi, yaitu *Simplex LP*, *GRG Nonlinear*, dan *Evolutionary*. Metode *Simplex LP* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi yang memiliki fungsi tujuan dan kendala berbentuk linear. Metode *GRG Nonlinear (Generalized Reduced Gradient)* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan *nonlinier* yang memiliki fungsi kontinu dan dapat diturunkan (*smooth*). Sementara itu, metode *Evolutionary* merupakan algoritma optimasi berbasis evolusi yang dirancang untuk menyelesaikan permasalahan yang bersifat *nonlinier*, melibatkan variabel diskrit, fungsi yang tidak kontinu, maupun kendala logika yang kompleks (Taha, 2017).

Dalam penggunaannya, *Microsoft Excel Solver* memiliki tiga komponen utama yang harus ditentukan oleh pengguna, yaitu:

1. *Set Objective* (Fungsi Tujuan)

Set Objective merupakan sel yang berisi fungsi tujuan yang akan dioptimalkan. Pengguna dapat menentukan apakah nilai pada fungsi tujuan akan dimaksimumkan (*Max*), diminimumkan (*Min*), atau dibuat sama dengan nilai tertentu (*Value Of*). Solver akan mencari solusi terbaik sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan.

2. By Changing Variable Cells (Variabel Keputusan)

By Changing Variable Cells merupakan sel yang berisi variabel keputusan yang nilainya dapat diubah oleh *Solver* selama proses optimasi. Perubahan nilai variabel tersebut dilakukan secara otomatis untuk memperoleh solusi yang paling optimal sesuai fungsi tujuan.

3. Subject to the Constraints (Kendala)

Subject to the Constraints merupakan batasan-batasan yang harus dipenuhi selama proses optimasi. Kendala digunakan untuk memastikan bahwa solusi yang dihasilkan tetap berada dalam ruang solusi yang layak (*feasible solution*). Kendala dapat berupa persamaan, pertidaksamaan, batas nilai minimum atau maksimum, maupun hubungan logis antar variabel sesuai karakteristik permasalahan yang diselesaikan.

Proses optimasi pada *Microsoft Excel Solver* dilakukan secara berulang-ulang sesuai dengan metode yang dipilih. *Solver* akan mengevaluasi berbagai kombinasi nilai variabel keputusan hingga diperoleh solusi yang memenuhi seluruh kendala dan memberikan nilai fungsi tujuan yang paling optimal. Oleh karena itu, *Microsoft Excel Solver* menjadi salah satu perangkat optimasi yang banyak digunakan dalam penelitian maupun penyelesaian permasalahan pengambilan keputusan karena kemampuannya dalam menangani model optimasi dengan tingkat kompleksitas yang beragam (Citra et al., 2019).