



# Tinjauan Jalur Kritis Untuk Efisiensi Waktu Dan Biaya Pada Proyek Perluasan Jaringan Pipa Sistem Penyediaan Air Minum Tembudan

Reza Arisandi<sup>1</sup>, Gunawan Wibisono<sup>2</sup>, Sufriady Syam<sup>3</sup>, Rahmatullah<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Teknik dan Konservasi, Universitas Muhammadiyah Berau, Kabupaten Berau, Indonesia

Email korespondensi: [rezaarisandi16@gmail.com](mailto:rezaarisandi16@gmail.com)

<sup>2</sup>Teknik Lingkungan, Teknik dan Konservasi, Universitas Muhammadiyah Berau, Kabupaten Berau, Indonesia

Email korespondensi: [gunawan@umberau.ac.id](mailto:gunawan@umberau.ac.id)

<sup>3</sup>Teknik Lingkungan, Teknik dan Konservasi, Universitas Muhammadiyah Berau, Kabupaten Berau, Indonesia

Email korespondensi: [sufriady@umberau.ac.id](mailto:sufriady@umberau.ac.id)

<sup>4</sup>Teknik Sipil, Teknik dan Konservasi, Universitas Muhammadiyah Berau, Kabupaten Berau, Indonesia

Email korespondensi: [rahmatullah@umberau.ac.id](mailto:rahmatullah@umberau.ac.id)

## Abstrak

Proyek perluasan/pengembangan jaringan pipa Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Tembudan Batu Putih di Kabupaten Berau (TA 2024) bertujuan meningkatkan cakupan layanan air bersih. Kompleksitas lintas-disiplin dan keterikatan dependensi menjadikan proyek rentan terhadap deviasi waktu-biaya, sehingga diperlukan strategi percepatan yang ekonomis. Penelitian ini menerapkan *Critical Path Method* (CPM) dan *crashing* berbasis lembur terukur tiga jam per hari. Data yang digunakan meliputi jadwal rencana (baseline CPM), RAB Adendum 2 (CCO2), laporan progres mingguan/bulanan, dan wawancara pelaksana. Hasil menunjukkan durasi total berkurang dari 201 menjadi 193 hari (percepatan 8 hari) dengan tambahan biaya Rp 153.664.113,37. Total biaya setelah percepatan menjadi Rp 15.559.137.113,37 (dari *baseline* Rp 15.405.473.000,00). Biaya percepatan per hari = Rp 19.208.014,17. Temuan ini menegaskan efektivitas CPM dan *crashing* (lembur 3 jam/hari) dalam meningkatkan kinerja waktu-biaya tanpa mengorbankan mutu.

Kata kunci: *Critical Path Method*; *crashing*; kurva-S; efisiensi waktu; biaya proyek; jalur kritis.

## PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih merupakan layanan publik esensial yang menuntut infrastruktur andal dan pengelolaan proyek yang akuntabel. Di Kabupaten Berau, pengembangan jaringan perpipaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Tembudan diran-cang untuk meningkatkan cakupan layanan sekaligus menjawab pertumbuhan kebutuhan air domestik. Namun, kompleksitas paket pekerjaan lintas-disiplin (sipil-arsitektur-mekanikal-elektrikal) dan keterikatan dependensi antarkegiatan menjadikan proyek sangat sensitif terhadap keterlambatan, sehingga diperlukan pendekatan manajemen yang

menyeimbangkan kinerja waktu dan biaya secara sistematis (PMI, 2021).

Dalam konteks pengendalian jadwal, *Critical Path Method* (CPM) menyediakan kerangka kuantitatif untuk memetakan jaringan kerja, menghitung *float*, serta menetapkan lintasan kritis yang memusatkan perhatian manajerial pada kegiatan tanpa kelonggaran (Kerzner, 2017). Informasi ini penting untuk mengarahkan sumber daya, menerapkan strategi percepatan hanya pada aktivitas yang benar-benar memengaruhi durasi total, dan meminimalkan rework akibat intervensi yang tidak tepat sasaran. Pemantauan konsistensi antara rencana dan realisasi didukung oleh analisis

kurva-S sebagai indikator deviasi waktu-biaya (Konior & Szóstak, 2020).

Ketika terjadi potensi keterlambatan, pendekatan *time-cost trade-off* melalui teknik *crashing* menjadi opsi rasional untuk memangkas durasi dengan konsekuensi kenaikan biaya marjinal yang terukur (Warman, 2014). Pada praktik lapangan, penambahan jam kerja (lembur) sering dipilih karena tidak menuntut mobilisasi tenaga kerja baru dan relatif cepat dieksekusi, meskipun perlu batasan agar tidak berdampak negatif terhadap mutu dan keselamatan (Sutrisno et al., 2023). Oleh karena itu, skenario lembur yang terukur seperti penambahan tiga jam per hari perlu dievaluasi berbasis data produktivitas dan biaya agar menghasilkan keputusan percepatan yang ekonomis.

Penelitian ini menempatkan proyek perluasan/pengembangan jarring-an pipa SPAM Tembudan (TA 2024) sebagai studi kasus untuk mengisi kesenjangan bukti empiris penerapan CPM dan *crashing* pada infrastruktur air bersih daerah.

Rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut: (1) bagaimana mengidentifikasi lintasan kritis proyek menggunakan CPM; (2) faktor-faktor apa yang menyebabkan deviasi durasi rencana-aktual yang relevan terhadap perubahan lintasan kritis; (3) seberapa efektif skenario percepatan berbasis lembur tiga jam per hari dalam memangkas durasi serta dampaknya terhadap biaya proyek (Kerzner, 2017).

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) memetakan jaringan kerja dan menetapkan jalur kritis proyek menggunakan CPM; (2) menganalisis penyebab deviasi rencana-aktual yang berpengaruh terhadap jalur kritis; (3) mengevaluasi efektivitas *crashing* melalui penambahan lembur tiga jam per hari terhadap pengurangan durasi dan perubahan biaya, serta menyusun

implikasi manajerial bagi pengambilan keputusan percepatan (PMI, 2021).

## METODE PENELITIAN DAN PUSTAKA

### 1. Pendekatan dan Desain

Penelitian menerapkan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis jaringan kerja untuk menilai efisiensi waktu biaya proyek konstruksi. Analisis difokuskan pada perubahan lintasan kritis dan konsekuensi biayanya ketika diterapkan *crashing* berbasis lembur 3 jam/hari pada aktivitas terpilih (PMI, 2021).

### 2. Data dan Ruang Lingkup

Sumber data mencakup:

- jadwal rencana berbasis CPM (struktur WBS, durasi, dan ketergantungan),
- RAB/adendum (harga satuan upah, volume pekerjaan), dan
- rekap progres mingguan-bulanan (rencana vs aktual).

Variabel utama: durasi normal, volume, produktivitas harian/jam, biaya normal, biaya lembur, dan durasi/biaya setelah *crash*. Aturan kerja mengikuti hari kerja efektif dengan jam kerja normal 8 jam/hari; lembur dimodelkan sebagai tambahan jam kerja dengan faktor efektivitas ( $b$ ) yang  $< 1$  untuk mencerminkan penurunan produktivitas marjinal pada jam lembur (PMI, 2021).

### 3. Prosedur Analisis

Langkah analisis disusun berurutan:

- Menyusun WBS dan memetakan jaringan *Activity-on-Node* (AoN) dengan hubungan dominan FS (*finish-to-start*).
- Menghitung parameter CPM untuk memperoleh lintasan kritis dan besaran *float*.
- Menyeleksi kandidat percepatan pada lintasan kritis/ *near-critical*

dengan dampak terbesar terhadap durasi proyek.

- d. Mensimulasikan *crashing* 3 jam/hari pada kandidat terpilih dan menghitung durasi-biaya setelah *crash*.
- e. Mengevaluasi *time-cost trade-off* (TCTO) untuk memilih titik percepatan di daerah efisien, kemudian memeriksa keselarasan dengan Kurva-S rencana vs aktual (PMI, 2021).

#### 4. Formulasi Inti CPM

Perhitungan maju (*forward pass*) dan mundur (*backward pass*):

- $EF = ES + \text{Durasi}$ ;  $ES = \max(\text{EF pendahulu})$
- $LS = LF - \text{Durasi}$ ;  $LF = \min(\text{LS penerus})$
- $\text{Total float (TF)} = LF - ES$ ;  $\text{Free float (FF)} = \min(\text{ES penerus}) - EF$

Aktivitas dengan  $TF = 0$  menyusun lintasan kritis; percepatan pada lintasan ini langsung menurunkan durasi total proyek (PMI, 2021).

#### 5. Model Crashing (Lembur 3 Jam)

Produktivitas harian dihitung dari Volume/Durasi normal; produktivitas per jam = produktivitas harian/8. Setelah *crash*, produktivitas efektif menjadi kontribusi jam normal + jam lembur yang dikalibrasi efektivitasnya:

- $\text{Prod crash} = (8 \times \text{Prod/jam}) + (3 \times b \times \text{Prod/jam})$
- $\text{Durasi crash} = \text{Volume} / \text{Prod}_{\text{crash}}$

Untuk pola pergantian /penambahan *shift*:

- $\text{Shift Duration} = (\text{Durasi aktual} \times \text{Prod}_{\text{normal}}) / (\text{Prod normal} + \text{Prod lembur})$ . Komponen biaya disusun dari biaya normal (per

hari/jam), biaya lembur bertingkat, dan biaya *crash*.

Tambahan biaya per aktivitas dapat diringkas sebagai:

- $\Delta \text{Cost} = (\text{Upah}_{\text{crash}} - \text{Upah}_{\text{normal}}) \times \text{Durasi}_{\text{crash}}$ . Pemilihan 3 jam didasarkan pada uji skenario: 1-2 jam belum menurunkan durasi secara bermakna, sedangkan >3 jam menaikkan risiko mutu dan K3; karenanya 3 jam diambil sebagai batas efektif (PMI, 2021).

#### 6. Evaluasi Time-Cost Trade-Off (TCTO)

Setiap skenario menghasilkan pasangan (durasi total, biaya total) yang diplot pada kurva TCTO. Titik keputusan dipilih di daerah efisien, yakni ketika pemangkasan durasi proporsional dengan kenaikan biaya. Pemilihan mempertimbangkan dampak sistemik:

- reservoir sebagai prasyarat *pre-commissioning/commissioning*,
- pipa jaringan utama sebagai paket berdurasi terpanjang dan bersifat linear,
- serta ME sebagai penentu kesiapan operasional (PMI, 2021).

#### 7. Pengendalian dengan Kurva-S

Kurva-S rencana vs aktual digunakan untuk menilai deviasi kemajuan kumulatif, mengidentifikasi fase perlambatan /percepatan, dan memverifikasi bahwa intervensi *crashing* di aktivitas kritis/ *near-critical* sinkron dengan kondisi lapangan (akses, *tie-in*, *interfacing* ME). Integrasi CPM-*crashing*-TCTO dengan pembacaan Kurva-S menjaga keputusan percepatan tetap terukur, ekonomis, dan terkendali mutu/K3 (PMI, 2021).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Gambaran Umum Proyek

Objek kajian adalah pekerjaan perluasan/pengembangan jaringan pipa SPAM Tembudan Batu Putih (TA 2024) di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Paket/sub-pekerjaan utama meliputi: *Reservoir* 1000 m<sup>3</sup>, Rehab *Intake*, Rumah Pompa Distribusi, Rumah Genset, Rumah Jaga Operator, Pipa Jaringan Utama, Sambungan Rumah (SR), Mekanikal-Elektrikal (ME), dan pekerjaan pendukung.

### 2. Analisis Rencana vs Aktual & Jalur Kritis

Rekap rencana vs aktual menunjukkan pergeseran durasi pada sejumlah paket yang memengaruhi lintasan kritis. Evaluasi slack mengonfirmasi perubahan jalur kritis aktual pada bagian pekerjaan dengan *interfacing* ketat (struktur, ME, pipa). Intervensi percepatan perlu difokuskan pada aktivitas kritis dan *near-critical* (Kerzner, 2017).

### 3. Hasil Crashing (Lembur 3 Jam)

Ringkasan berikut memuat keluaran simulasi *crashing* pada aktivitas terpilih di lintasan kritis, mencakup perubahan durasi setiap aktivitas, konsekuensi biaya tambahan, dan dampaknya terhadap durasi proyek secara keseluruhan. Penyajian ini memudahkan penelusuran aktivitas yang paling responsif terhadap percepatan dan pengaruhnya pada jadwal akhir.

**Tabel 1. Hasil Crashing (Lembur 3 Jam)**

Parameter	Nilai
Durasi <i>baseline</i>	201 hari
Durasi setelah percepatan	193 hari
Percepatan	8 hari
Biaya <i>baseline</i>	Rp 15.405.473.000,00
Tambahan biaya percepatan	Rp 153.664.113,37
Total biaya setelah percepatan	Rp 15.559.137.113,37
Biaya percepatan per hari	Rp 19.208.014,17

Rumus ringkas: Total setelah percepatan = Baseline + Δbiaya = Rp 15.405.473.000,00 + Rp 153.664.113,37 = Rp 15.559.137.113,37.

### 4. Kurva Time-Cost Trade-off

Visual berikut menampilkan hubungan durasi biaya pada berbagai skenario sehingga pergeseran dari kondisi normal menuju kondisi percepatan dapat diamati dengan jelas. Kontur kurva menandai daerah efisien yakni pengurangan waktu yang masih sebanding dengan kenaikan biaya sebagai dasar pemilihan skenario percepatan yang rasional.



Gambar 1. Kurva TCTO - titik normal vs percepatan.

Data berikut menyajikan pasangan nilai (durasi total, biaya total) yang digunakan untuk membentuk Kurva TCTO. Penyertaan angka-angka ini memungkinkan verifikasi silang antara grafik dan perhitungan serta menelusuri proses terbentuknya kurva dari hasil *crashing* pada setiap paket pekerjaan.

**Tabel 2. Koordinat Kurva TCTO (Durasi-Biaya)**

Titik	Durasi (hari)	Biaya (Rp)
Normal (baseline)	201	Rp 15.405.473.000,00
Setelah percepatan	193	Rp 15.559.137.113,37

## 5. Ilustrasi Jaringan & Kurva-S

Visual berikut memperlihatkan perbandingan kemajuan kumulatif rencana dan realisasi sepanjang periode pelaksanaan. Perbedaan gradien dan jarak antarkurva menandai fase percepatan maupun perlambatan, sehingga deviasi kinerja dapat diidentifikasi secara temporal dan dikaitkan dengan keputusan percepatan pada aktivitas kritis.

Bobot (%)	Bulan Ke 0	Bulan Ke 1	Bulan Ke 2	Bulan Ke 3	Bulan Ke 4	Bulan Ke 5	Bulan Ke 6	Bulan Ke 7	Bulan Ke 8	Keterangan
1.36%	0.27%	0.27%	0.27%	0.27%	0.27%					100.00%
0.55%	0.27%	0.27%	0.27%	0.27%	0.27%					98.64%
0.74%	0.34%	0.40%								98.09%
58.90%			0.04%	0.05%	1.55%	9.83%	26.73%	20.79%		97.35%
0.53%		0.11%	0.42%		8.25%	34.17%	41.88%	1.95%		38.45%
2.02%			0.61%	0.80%	0.61%		0.72%	0.31%		37.92%
1.50%			0.12%	1.38%			0.84%	0.32%		35.90%
0.30%		0.31%	0.22%	4.68%	0.07%			0.24%		34.40%
24.73%					17.03%	7.63%	0.07%	0.30%		34.10%
8.74%				5.40%	1.45%	0.53%	0.36%	1.40%		9.37%
0.49%			0.32%		1.01%	2.05%	2.98%	0.88%		0.63%
0.14%					0.22%	0.22%		0.49%		0.14%
100.00%										
Reservuar	0.72%	0.89%	1.41%	9.25%	30.90%	35.11%	21.71%	0.00%		
Total Rencana	0.72%	1.61%	3.03%	12.28%	43.18%	78.29%	100.00%	100.00%		
Realisasi	0.38%	0.69%	1.11%	5.37%	35.47%	21.91%	22.10%	1.88%		
Total Realisasi	0.38%	1.07%	1.77%	16.84%	53.42%	75.03%	98.12%	100.00%		
Deviasi	-0.34%	-0.54%	-1.92%	-3.01%	-12.71%	-13.38%	-77.90%	-98.12%		

Gambar 2. Kurva-S Rencana vs Aktual.

Bagian berikut menegaskan paket pekerjaan yang berada pada lintasan kritis maupun near-critical sebagai pijakan penetapan prioritas percepatan. Fokus diarahkan pada paket dengan dampak terbesar terhadap pemendekan durasi total agar sumber daya percepatan digunakan secara efektif.

Tabel 3. Ringkasan Paket Kritis & Near-Critical

Paket/Sub-pekerjaan	Posisi
Reservoir 1000 m <sup>3</sup>	Kritis
Pipa Jaringan Utama	Kritis
ME (panel/MCC, pompa, kabel, terminasi)	Near-critical

Reservoir berperan sebagai prasyarat uji kebocoran dan pengisian awal serta menjadi predecessor bagi

sebagian pekerjaan mekanikal-elektrikal (ME). Percepatan dipilih untuk menjaga jadwal *pre-commissioning/ commissioning* tidak bergeser dan memenuhi dependensi hilir. Implementasi *overlap* dengan pekerjaan pipa pada minggu ke-13 disertai kendali mutu ketat mulai dari curing beton, uji slump, hingga penerapan waterproofing agar lembur 3 jam tidak menurunkan kualitas hasil.

Dengan durasi terpanjang, sifat kerja linear, dan banyak titik crossing/tie-in, paket ini paling menentukan durasi proyek. Percepatan difokuskan pada siklus galian, pemasangan, penimbunan untuk menghasilkan pemangkasan waktu yang signifikan tanpa mengorbankan integritas sistem. Di lapangan, diterapkan segmentasi zona agar pekerjaan dapat diparalelkan, pengaturan akses/lalu lintas kerja yang ketat, serta penjadwalan uji tekan (hydrostatic test) pada jam normal guna menjaga reliabilitas.

Paket ME memiliki interfacing erat dengan reservoir dan pipa serta dipengaruhi ketersediaan *long-lead items*. Percepatan pada tahapan instalasi dan terminasi dipilih untuk mengamankan jadwal *pre-commissioning/ commissioning* sambil mempertahankan keselamatan dan mutu pekerjaan. Karena karakter kerja yang presisi, percepatan diterapkan selektif pada pemasangan dan testing, sementara lembur lebih dari 3 jam dihindari untuk meminimalkan risiko kelelahan operator dan potensi cacat instalasi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis jalur kritis dan simulasi strategi percepatan menggunakan metode *crashing* pada proyek Perluasan Jaringan Pipa SPAM

Tembudan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *Critical Path Method* (CPM) berhasil mengidentifikasi aktivitas-aktivitas kunci yang berada pada jalur kritis sehingga memberikan arah intervensi percepatan yang tepat sasaran. Durasi penyelesaian pekerjaan berdasarkan rencana awal adalah 201 hari kalender. menjadi
2. Faktor-faktor utama yang memengaruhi keterlambatan tersebut antara lain kondisi cuaca, keterbatasan material dan peralatan, akses kerja pada koridor pipa yang linear, serta keterlambatan *interfacing* antara pekerjaan yang juga berkontribusi terhadap keterlambatan proyek.
3. Metode CPM yang dipadukan dengan strategi *crashing* terbukti efektif memendekkan durasi proyek sekaligus menjaga efisiensi biaya. Skenario lembur 3 jam/hari pada aktivitas terpilih memberi penurunan durasi dari 201 hari menjadi 193 hari dengan kenaikan biaya yang masih berada pada rentang efisien. Percepatan ini memerlukan tambahan biaya sebesar Rp153.664.113,37 sehingga total biaya proyek meningkat menjadi Rp15.559.137.113,37 atau mengalami kenaikan sekitar 1% dari biaya awal.

Jembatan Kampung Bena Baru Kabupaten Berau. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 12(1), 35–41. <https://doi.org/10.20527/jtb.v12i1.242>

Kurniawan, Robi, & Managi, Shunsuke. (2018). Economic Growth and Sustainable Development in Indonesia: An Assessment \*. *Bulletin of Indonesian Economic Studies*, 54(3), 339–361. <https://doi.org/10.1080/00074918.2018.1450962>

Wang, Hao, Jasim, Abbas, & Chen, Xiaodan. (2018). Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. *Applied Energy*, 212(December 2017), 1083–1094. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.125>

## DAFTAR PUSTAKA

- Costin, A. (2018). Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
- Fanani, Ammar, & Kartadipura, Retna Hapsari. (2023). Peningkatan Jalur Transportasi Menuju Kampung Budaya Melalui Proyek Pembangunan