

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Penelitian

5.1.1 Gambaran Umum Proyek



Gambar 5. 1 Proyek Jembatan Gantung

Proyek pembangunan jembatan gantung yang menjadi objek penelitian memiliki durasi rencana pelaksanaan selama 60 hari kalender. Namun, berdasarkan data proyek, pelaksanaan mengalami keterlambatan sehingga proyek selesai dalam waktu 76 hari kalender. Dengan demikian, terjadi keterlambatan selama 16 hari kalender dari durasi yang direncanakan.

Dalam periode pelaksanaan proyek terdapat 4 hari libur Hari Raya yang tidak terdapat aktivitas pekerjaan. Oleh karena itu, dari total 76 hari kalender tersebut diperoleh durasi efektif pekerjaan selama 72 hari kerja. Durasi efektif 72 hari kerja ini selanjutnya digunakan sebagai durasi normal dalam analisis lintasan kritis dan penerapan metode *Time Cost Trade-Off* (TCTO).

5.1.2 Data Biaya Proyek

Data biaya proyek bersumber dari Rencana Anggaran Biaya (RAB) Pelaksana. Berdasarkan Tabel 5.1, total anggaran proyek dibulatkan menjadi Rp 931.880.000,00.

Tabel 5. 1 Rancangan Anggaran Biaya Pelaksana (RAP)

NO	URAIAN	VOL.	SAT.	HARGA SATUAN	JUMLAH
I. PEKERJAAN PERSIAPAN					
1	Pengukuran / Uitzet	1,00	ls	Rp 10.000.000,00	Rp 10.000.000,00
2	Dokumentasi dan Pelaporan	1,00	ls	Rp 2.500.000,00	Rp 2.500.000,00
3	Papan Nama Proyek	1,00	unit	Rp 150.000,00	Rp 150.000,00
4	Prasasti Jembatan 30x40 cm	1,00	unit	Rp 350.000,00	Rp 350.000,00
Jumlah Biaya Pekerjaan Persiapan					Rp 13.000.000
II. PEKERJAAN KONSTRUKSI					
1	Galian tanah	82,49	m3	Rp 86.175,00	Rp 7.108.575,75
2	Pekerjaan Perkerasan Jalan masuk ke jembatan gantung (Urugan tanah Cabluk)	20,91	m3	Rp 210.235,00	Rp 4.395.822,73
3	Pasangan Batu Pondasi	123,33	m3	Rp 1.077.500,00	Rp 132.891.666,67
4	Pasangan Plesteran	97,50	m2	Rp 65.914,00	Rp 6.426.615,00
5	Acian	97,50	m2	Rp 35.675,00	Rp 3.478.312,50
6	Pekerjaan Pembesian	2.638,10	kg	Rp 18.242,00	Rp 48.124.133,33
7	Pasangan Pondasi Beton K.250	70,13	m3	Rp 1.363.340,00	Rp 95.610.857,14
8	Pasangan Bekisting	138,29	m2	Rp 231.438,75	Rp 32.005.664,74
9	Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (<i>Erection works</i>)	13.724,62	kg	Rp 39.916,51	Rp 547.838.917,75
Jumlah Biaya Pekerjaan Konstruksi					Rp 877.880.565,61
III. BIAYA PEKERJAAN LAIN-LAIN					
1	Sewa Mess Pekerja	2,00	bln	Rp 750.000,00	Rp 1.500.000,00
2	Upah Pelaksana Lapangan (2 Orang)	2,00	bln	Rp 8.250.000,00	Rp 16.500.000,00
3	Uang Makan Pengawas (2 Orang)	2,00	bln	Rp 7.000.000,00	Rp 14.000.000,00
4	Biaya Lainnya	2,00	bln	Rp 4.500.000,00	Rp 9.000.000,00
Jumlah Biaya Pekerjaan lain-lain					Rp 41.000.000,00
Jumlah Total Biaya					Rp 931.880.565,61
Jumlah Total Biaya dibulatkan					Rp 931.880.000,00

Data anggaran biaya ini akan digunakan untuk mencari atau memisahkan biaya langsung dan tidak langsung.

Data *Time Schedule* (kurva-s) ini digunakan untuk mencari durasi untuk setiap pekerjaan, dan digunakan untuk mencari lintasan kritis di *Microsoft Project*.

Tabel 5. 2 Rekap Durasi Pekerjaan

NO	URAIAN PEK.	VOL.	SAT.	DURASI (Hari)
I. PEKERJAAN PERSIAPAN				
1	Pengukuran / Uitzet	1,00	ls	3
2	Dokumentasi dan Pelaporan	1,00	ls	72
3	Papan Nama Proyek	1,00	unit	1
4	Prasasti Jembatan 30x40 cm	1,00	unit	1
II. PEKERJAAN KONSTRUKSI				
1	Galian tanah	82,49	m3	8
2	Pekerjaan Perkerasan Jalan masuk ke jembatan gantung (Urugan tanah Cabluk)	20,91	m3	3
3	Pasangan Batu Pondasi	123,33	m3	10
4	Pasangan Plesteran	97,50	m2	5
5	Acian	97,50	m2	4
6	Pekerjaan Pembesian	2.638,10	kg	8
7	Pasangan Pondasi Beton K.250	70,13	m3	14
8	Pasangan Bekisting	138,29	m2	3
9	Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (<i>Erection works</i>)	13.724,62	kg	26

5.1.4 Data Harga Satuan Pekerjaan

Data harga satuan upah pekerja diambil dari AHSP. Data ini diperlukan untuk setiap pekerjaan yang akan dilakukan percepatan, untuk daftar harga satuan upah pekerja bisa dilihat di tabel berikut ini:

Tabel 5. 3 Rekap Harga Satuan Upah

No.	Nama Pekerjaan	Harga Satuan Upah Pekerja (Rp)
1	Galian Tanah	86.175
2	Pasangan Batu Pondasi	231.000
3	Pasangan Bekisting	101.640
4	Pekerjaan Pembesian	1.492
5	Pasangan Pondasi Beton K.250	190.140
6	Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (<i>Erection works</i>)	3.666

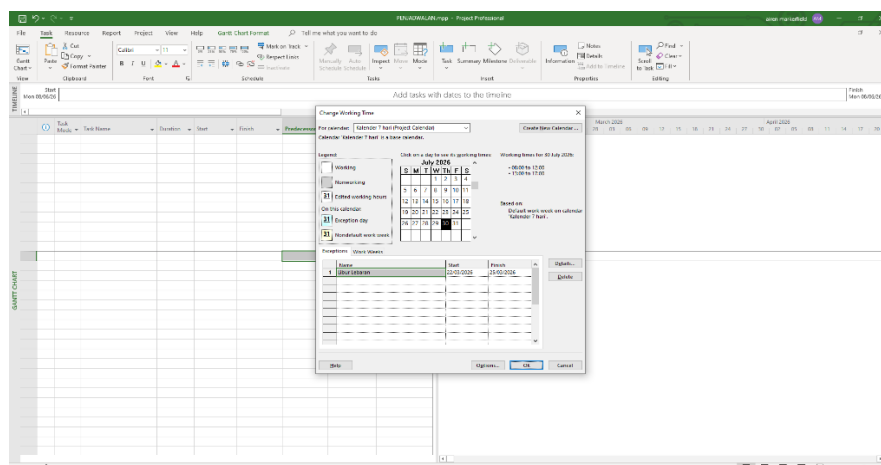
5.2 Pengolahan Data

5.2.1 Identifikasi Lintasan Kritis

Untuk menentukan prioritas pekerjaan yang akan dipercepat, langkah pertama adalah melakukan identifikasi lintasan kritis (*critical path*). Analisis ini dilakukan menggunakan data jadwal pelaksanaan proyek yang diolah dengan perangkat lunak *Microsoft Project* untuk mengidentifikasi rangkaian aktivitas yang memengaruhi durasi penyelesaian proyek.

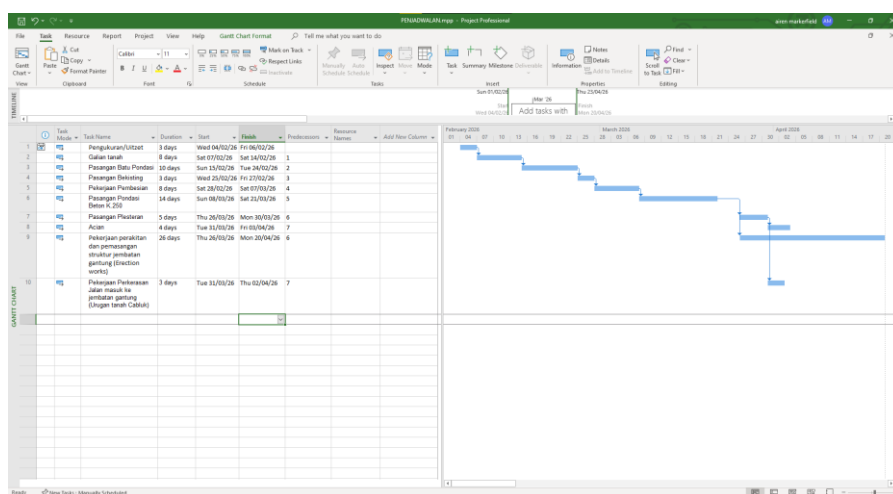
Langkah-langkah mengidentifikasi hubungan antar aktivitas pekerjaan:

1. Mengatur waktu kerja (*Working Time*). Waktu kerja proyek ini adalah 7 hari kalender, dengan libur 4 hari di tanggal 22/03/2026 -25/03/2026.



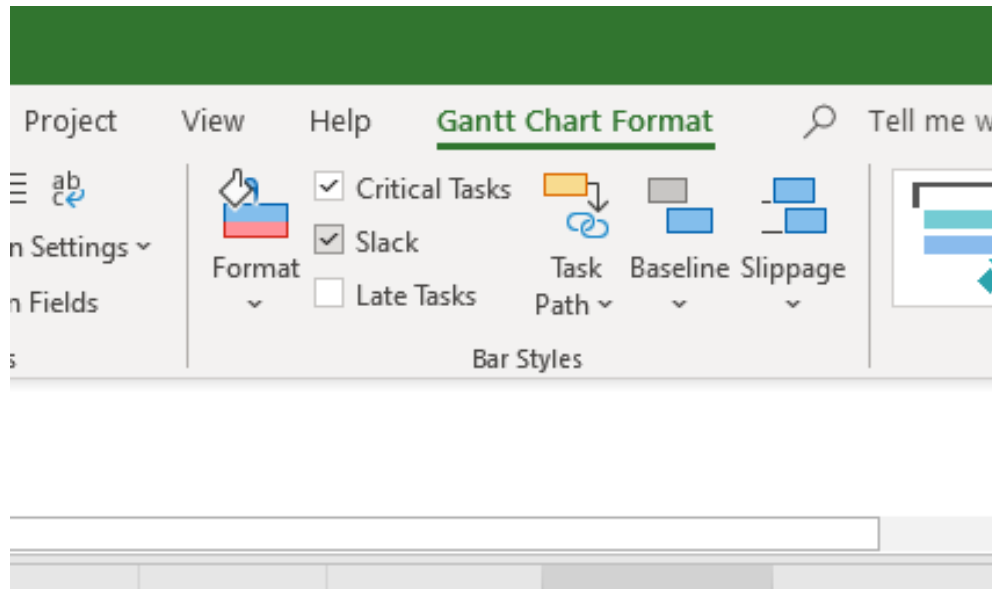
Gambar 5. 3 Mengatur Waktu Kerja/Working Time

2. Mengisi nama aktivitas atau pekerjaan di kolom "Task name"



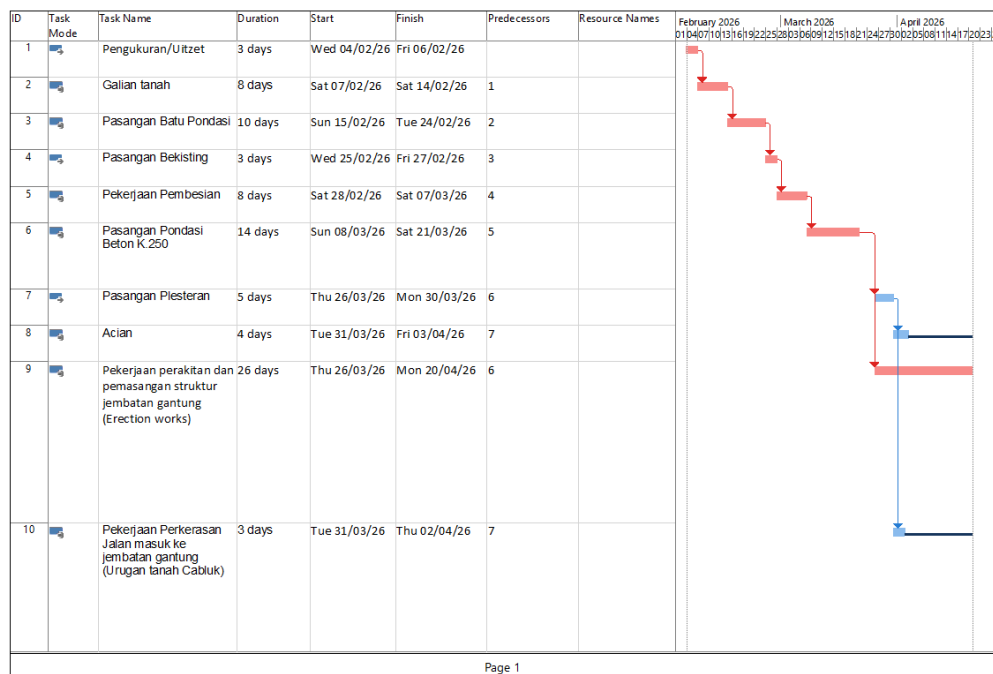
Gambar 5. 4 Mengisi Task Name

- Menampilkan lintasan kritis dengan mencentang pada ikon critical task di bagian toolbar “gantt chart format” dan aktivitas yang masuk lintasan kritis akan berubah menjadi warna merah.



Gambar 5. 5 Menampilkan Lintasan Kritis

- Setelah itu simpan project tersebut dengan print as.



Gambar 5. 6 Lintasan Kritis Pekerjaan

Berdasarkan hasil identifikasi menggunakan *Microsoft Project*, diperoleh daftar pekerjaan-pekerjaan yang berada di lintasan kritis dan disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 4 Pekerjaan Di Lintasan Kritis

No.	Nama Pekerjaan	Durasi (Hari)
1	Pengukuran/ <i>Uitzet</i>	3
2	Galian Tanah	8
3	Pasangan Batu Pondasi	10
4	Pasangan Bekisting	3
5	Pekerjaan Pembesian	8
6	Pasangan Pondasi K.250	14
7	Pekerjaan Perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung/ <i>Erection Works</i>	26

Dari daftar pekerjaan di lintasan kritis di atas diperoleh total durasi kerja proyek ini adalah: $t_n = 72$ hari kerja (efektif). Durasi normal 72 hari. Periode pelaksanaan mencakup 4 hari libur Hari Raya yang diperhitungkan dalam kalender proyek sehingga total waktu pelaksanaan proyek normal adalah 76 hari kalender. Pekerjaan “Pengukuran/*Uitzet*” termasuk dalam lintasan kritis, akan tetapi Pengukuran tidak dimasukkan dalam simulasi *crashing* karena tidak tersedia rincian komponen tenaga kerja yang memadai untuk menghitung produktivitas, *crash cost*, dan *cost slope* secara konsisten.

5.2.2 Menganalisis perubahan durasi dan biaya proyek

5.2.2.1 Menentukan Biaya Langsung & Tidak Langsung

Biaya langsung mencakup seluruh pengeluaran yang terikat dengan volume pekerjaan fisik. Adapun tabel rekap biaya langsung berikut ini:

Tabel 5. 5 Rekap Biaya Langsung

NO	URAIAN	VOL.	SAT.	HARGA SATUAN	JUMLAH
I. PEKERJAAN PERSIAPAN					
1	Pengukuran / Uitzet	1,00	ls	Rp 10.000.000,00	Rp 10.000.000,00
2	Dokumentasi dan Pelaporan	1,00	ls	Rp 2.500.000,00	Rp 2.500.000,00
3	Papan Nama Proyek	1,00	unit	Rp 150.000,00	Rp 150.000,00
4	Prasasti Jembatan 30x40 cm	1,00	unit	Rp 350.000,00	Rp 350.000,00
Jumlah Biaya Pekerjaan Persiapan					Rp 13.000.000
II. PEKERJAAN KONSTRUKSI					
1	Galian tanah	82,49	m3	Rp 86.175,00	Rp 7.108.575,75
2	Pekerjaan Perkerasan Jalan masuk ke jembatan gantung (Urugan tanah Cabluk)	20,91	m3	Rp 210.235,00	Rp 4.395.822,73
3	Pasangan Batu Pondasi	123,33	m3	Rp 1.077.500,00	Rp 132.891.666,67
4	Pasangan Plesteran	97,50	m2	Rp 65.914,00	Rp 6.426.615,00
5	Acian	97,50	m2	Rp 35.675,00	Rp 3.478.312,50
6	Pekerjaan Pembesian	2.638,10	kg	Rp 18.242,00	Rp 48.124.133,33
7	Pasangan Pondasi Beton K.250	70,13	m3	Rp 1.363.340,00	Rp 95.610.857,14
8	Pasangan Bekisting	138,29	m2	Rp 231.438,75	Rp 32.005.664,74
9	Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (<i>Erection works</i>)	13.724,62	kg	Rp 39.916,51	Rp 547.838.917,75
Jumlah Biaya Pekerjaan Konstruksi					Rp 877.880.565,61
Total Biaya					Rp 890.880.565,61

Berdasarkan Tabel 5.5, total biaya langsung dihitung sebagai berikut:

$$DC = 13.000.000 + 877.880.566 = \text{Rp } 890.880.566$$

Biaya tidak langsung merupakan pengeluaran operasional (seperti sewa mess dan upah pelaksana, dan sebagainya) yang bergantung pada durasi proyek.

Berdasarkan tabel 5.5, biaya tidak langsung pada proyek ini di antaranya:

Tabel 5. 6 Rekap Biaya Tidak Langsung

III. BIAYA PEKERJAAN LAIN-LAIN					
1	Sewa Mess Pekerja	2,00	bln	Rp. 750.000,00	Rp. 1.500.000,00
2	Upah Pelaksana Lapangan (2 Orang)	2,00	bln	Rp. 8.250.000,00	Rp. 16.500.000,00
3	Uang Makan Pengawas (2 Orang)	2,00	bln	Rp. 7.000.000,00	Rp. 14.000.000,00
4	Biaya Lainnya	2,00	bln	Rp. 4.500.000,00	Rp. 9.000.000,00
Jumlah Biaya					Rp. 41.000.000,00

Dari tabel di atas bisa dihitung total *overhead* hariannya adalah:

$$\text{Overhead harian} = \frac{\text{Rp } 41.000.000}{60} = \text{Rp } 683.333/\text{hari}$$

5.2.2.2 Perhitungan *Crashing*

Tahapan *crashing* difokuskan pada aktivitas yang berada di lintasan kritis. Percepatan durasi dilakukan melalui skenario penambahan jam kerja lembur dengan variasi 1 hingga 4 jam per hari. Dari perhitungan ini, akan didapatkan *crash duration*, *crash cost*, dan *cost slope* yang akan menjadi parameter utama untuk proses pencarian kombinasi lembur yang optimal dengan *Excel Solver*.

A. Menghitung *Crash Duration*

Langkah-langkah Menghitung *crash duration* yaitu:

1. Menghitung Produktivitas harian :

$$P_h = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{t_n}$$

Di mana:

P_h = Produktivitas harian

t_n = Durasi normal

2. Menghitung Produktivitas Per jam :

$$P_j = \frac{\text{Produktivitas harian}}{\text{Jam Kerja Normal Harian}}$$

Dimana:

P_j = Produktivitas per jam

Jam kerja normal harian = 7 jam efektif per hari (07.00-12.00 & 13.00-15.00)

Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 7 Produktivitas Harian & Per jam Normal

Uraian pekerjaan	Sat.	Prod. Harian	Prod. Per jam
Galian Tanah	m3	10,31	1,47
Pasangan Batu Pondasi	m3	12,33	1,76
Pasangan Bekisting	m2	46,10	6,59
Pekerjaan Pembesian	kg	329,75	47,11
Pasangan Pondasi Beton K.250	m3	5,01	0,72
<i>Erection works</i>	kg	527,87	75,41

3. Menghitung Produktivitas lembur :

$$P_{L1} = 1 * K_f * P_j$$

$$P_{L2} = P_{L1} + (1 * K_f * P_j)$$

$$P_{L3} = P_{L2} + (1 * K_f * P_j)$$

$$P_{L4} = P_{L3} + (1 * K_f * P_j)$$

Di mana:

P_L = Produktivitas Lembur

K_f = Koefisien Produktivitas dari tabel “Koefisien Penurunan Produktivitas”

Tabel 5. 8 Koefisien Penurunan Produktivitas

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

Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 9 Produktivitas Lembur

Uraian pekerjaan	Sat.	Prod. Lembur			
		1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	m3	1,3	2,5	3,5	4,4
Pasangan Batu Pondasi	m3	1,6	3,0	4,2	5,3
Pasangan Bekisting	m2	5,9	11,2	15,8	19,8
Pekerjaan Pembesian	kg	42,4	80,1	113,1	141,3
Pasangan Pondasi Beton K.250	m3	0,6	1,2	1,7	2,1
<i>Erection works</i>	kg	67,9	128,2	181,0	226,2

4. Menghitung Produktivitas harian setelah ditambah jam lembur:

$$C_p = P_h + P_L$$

Di mana:

C_p = Produktivitas setelah dipercepat

P_j = Produktivitas per jam

Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam tabel 5.10.

Tabel 5. 10 Produktivitas *Crash* Harian

Uraian pekerjaan	Sat.	Prod. <i>Crash</i> harian			
		1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	m3	11,6	12,8	13,8	14,7
Pasangan Batu Pondasi	m3	13,9	15,3	16,6	17,6
Pasangan Bekisting	m2	52,0	57,3	61,9	65,9
Pekerjaan Pembesian	kg	372,1	409,8	442,8	471,1
Pasangan Pondasi Beton K.250	m3	5,7	6,2	6,7	7,2
<i>Erection works</i>	kg	595,7	656,1	708,9	754,1

5. Menghitung *Crash Duration*:

$$t_c = \frac{\text{Volume pekerjaan}}{C_p}$$

Di mana:

t_c = Durasi setelah dipercepat

Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 11. *Crash Duration*

Uraian pekerjaan	<i>Crash Duration</i> (Hari)			
	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	7,09	6,44	5,96	5,60
Pasangan Batu Pondasi	8,86	8,05	7,45	7,00
Pasangan Bekisting	2,66	2,41	2,23	2,10
Pekerjaan Pembesian	7,09	6,44	5,96	5,60
Pasangan Pondasi Beton K.250	12,41	11,26	10,43	9,80
<i>Erection works</i>	23,04	20,92	19,36	18,20

Detail perhitungan *crash duration* tersebut disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 12 Detail Perhitungan Crash Duration

Uraian pekerjaan	Volume	Sat.	Durasi (Hari)	Prod. Harian	Prod. Per jam	Prod. Lembur				Prod. Crash				Crash Duration (Hari)			
						e				f				g = a/f			
						1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
	a		b	c = a/b	d = c/7	$e_1 = 1 * 0,9 * d$	$e_2 = e_1 + (1 * 0,8 * d)$	$e_3 = e_2 + (1 * 0,7 * d)$	$e_4 = e_3 + (1 * 0,6 * d)$	$f_1 = e_1 + c$	$f_2 = e_2 + c$	$f_3 = e_3 + c$	$f_4 = e_4 + c$	$g_1 = a/f_1$	$g_2 = a/f_2$	$g_3 = a/f_3$	$g_4 = a/f_4$
Galian Tanah	82,49	m3	8	10,31	1,47	1,33	2,50	3,54	4,42	11,64	12,82	13,85	14,73	7,09	6,44	5,96	5,60
Pasangan Batu Pondasi	123,33	m3	10	12,33	1,76	1,59	3,00	4,23	5,29	13,92	15,33	16,56	17,62	8,86	8,05	7,45	7,00
Pasangan Bekisting	138,29	m2	3	46,10	6,59	5,93	11,19	15,80	19,76	52,02	57,29	61,90	65,85	2,66	2,41	2,23	2,10
Pekerjaan Pembesian	2638	kg	8	329,75	47,11	42,40	80,08	113,06	141,32	372,15	409,83	442,81	471,07	7,09	6,44	5,96	5,60
Pasangan Pondasi Beton K.250	70,13	m3	14	5,01	0,72	0,64	1,22	1,72	2,15	5,65	6,23	6,73	7,16	12,41	11,26	10,43	9,80
Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (Erection works)	13724,62	kg	26	527,87	75,41	67,87	128,20	180,98	226,23	595,74	656,07	708,85	754,10	23,04	20,92	19,36	18,20

B. Menghitung Crash Cost

Langkah-langkah Menghitung *crash cost* yaitu:

1. Menghitung upah kerja harian normal

Upah Kerja harian Normal = P_h * Harga satuan upah kerja

Di mana:

P_h = Produktivitas harian

2. Menghitung upah kerja per jam normal :

Upah Kerja perjam Normal = P_j * Harga satuan upah kerja

Di mana:

P_j = Produktivitas per jam

Jam kerja normal harian = 7 jam per hari

Hasil perhitungan tersebut disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 13 Upah Harian & Upah Per Jam Normal

Uraian pekerjaan	Upah Harian Normal (Rp)	Upah Per Jam (Rp)
Galian Tanah	888.572	126.939
Pasangan Batu Pondasi	2.849.000	407.000
Pasangan Bekisting	4.685.265	669.324
Pekerjaan Pembesian	491.822	70.260
Pasangan Pondasi Beton K.250	952.464	136.066
<i>Erection works</i>	1.935.440	276.491

3. Menghitung upah kerja lembur :

Upah Kerja Lembur 1 jam = $(1 * 1,5) * \text{Upah per jam}$

Upah Kerja Lembur 2 jam = $(1 * 1,5) + (1 * 2) * \text{Upah per jam}$

Upah Kerja Lembur 3 jam = $(1 * 1,5) + (1 * 2) + (1 * 2) * \text{Upah per jam}$

Upah Kerja Lembur 4 jam = $(1 * 1,5) + (1 * 2) + (1 * 2) + (1 * 2) * \text{Upah per jam}$

Hasil perhitungannya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 14 Upah Kerja Lembur

Uraian pekerjaan	Upah Kerja lembur (Rp)			
	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	190.408	444.286	698.164	952.041
Pasangan Batu Pondasi	610.500	1.424.500	2.238.500	3.052.500
Pasangan Bekisting	1.003.985	2.342.633	3.681.280	5.019.927
Pekerjaan Pembesian	105.390	245.911	386.432	526.952
Pasangan Pondasi Beton K.250	204.099	476.232	748.364	1.020.497
<i>Erection works</i>	414.737	967.720	1.520.703	2.073.686

4. Menghitung *Crash Cost* tenaga kerja per hari :

Crash Cost per hari = Upah harian + upah kerja lembur

Hasil perhitungannya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 15 Crash Cost (Biaya percepatan) Harian

Uraian pekerjaan	Crash Cost Harian (Rp)			
	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	1.078.980	1.332.858	1.586.736	1.840.613
Pasangan Batu Pondasi	3.459.500	4.273.500	5.087.500	5.901.500
Pasangan Bekisting	5.689.251	7.027.898	8.366.545	9.705.192
Pekerjaan Pembesian	597.213	737.733	878.254	1.018.774
Pasangan Pondasi Beton K.250	1.156.563	1.428.696	1.700.828	1.972.961
<i>Erection works</i>	2.350.177	2.903.160	3.456.143	4.009.126

5. Menghitung *Crash Cost* total :

$$\text{Crash Cost total} = \text{Crash Cost per hari} * t_c$$

Di mana:

t_c = Durasi aktivitas setelah dipercepat

Hasil perhitungannya disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 5. 16 *Crash Cost Total*

Uraian pekerjaan	<i>Crash Cost Total (Rp)</i>			
	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	7.648.468	8.579.316	9.452.893	10.307.435
Pasangan Batu Pondasi	30.653.797	34.384.483	37.885.638	41.310.500
Pasangan Bekisting	15.123.324	16.963.891	18.691.218	20.380.904
Pekerjaan Pembesian	4.233.406	4.748.627	5.232.150	5.705.137
Pasangan Pondasi Beton K.250	14.347.240	16.093.354	17.732.039	19.335.016
<i>Erection works</i>	54.143.324	60.732.776	66.916.812	72.966.092

Untuk detail perhitungan-perhitungan tersebut disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 17 Detail Perhitungan *Crash Cost*

Uraian pekerjaan	Harga Satuan (Rp)	Prod. Harian	Upah Harian Normal (Rp)	Upah Per Jam (Rp)	Upah Kerja lembur (Rp)				Crash Cost Harian (Rp)				Crash Cost Total (Rp)			
	a	b	c=a*b	d = c/7	e				f				g = f * crash duration			
					1 jam e1=1,5*d	2 jam e2=e1+(2*d)	3 jam e3=e2+(2*d)	4 jam e4=e3+(2*d)	1 jam f1=c+e1	2 jam f2=c+e2	3 jam f3=c+e3	4 jam f4=c+e4	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	86.175	10,31	888.572	126.939	190.408	444.286	688.164	952.041	1.078.980	1.332.858	1.586.736	1.840.613	7.648.468	8.579.316	9.452.893	10.307.435
Pasangan Batu Pondasi	231.000	12,33	2.849.000	407.000	610.500	1.424.500	2.238.500	3.052.500	3.459.500	4.273.500	5.087.500	5.901.500	30.653.797	34.384.483	37.885.638	41.310.500
Pasangan Bekisting	101.640	46,10	4.685.265	669.324	1.003.985	2.342.633	3.681.280	5.019.927	5.689.251	7.027.898	8.366.545	9.705.192	15.123.324	16.963.891	18.691.218	20.380.904
Pekerjaan Pembesian	1.492	329,75	491.822	70.260	105.390	245.911	386.432	526.952	597.213	737.733	878.254	1.018.774	4.233.406	4.748.627	5.232.150	5.705.137
Pasangan Pondasi Beton K.250	190.140	5,01	952.464	136.066	204.099	476.232	748.364	1.020.497	1.156.563	1.428.696	1.700.828	1.972.961	14.347.240	16.093.354	17.732.039	19.335.016
Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (<i>Erection works</i>)	3.667	527,87	1.935.440	276.491	414.737	967.720	1.520.703	2.073.686	2.350.177	2.903.160	3.456.143	4.009.126	54.143.324	60.732.776	66.916.812	72.966.092

C. Menghitung *Cost Slope*

Rumus cost slope adalah:

$$\text{Cost Slope} = \frac{C_c - C_n}{t_n - t_c}$$

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

Hasil perhitungannya disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 18 Cost Slope

Uraian pekerjaan	Normal Duration (Hari)	Normal Cost (Rp)	Crash Duration (Hari)				Crash Cost (Rp)				Cost Slope (Rp)			
	a	b = upah harian normal * a	c				d				e = (d-b) / (a-c)			
			1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam
Galian Tanah	8	7.108.575,75	7	6	6	6	7.648.468	8.579.316	9.452.893	10.307.435	592.381	940.841	1.147.739	1.332.858
Pasangan Batu Pondasi	10	28.490.000,00	9	8	7	7	30.653.797	34.384.483	37.885.638	41.310.500	1.899.333	3.016.588	3.679.958	4.273.500
Pasangan Bekisting	3	14.055.795,60	3	2	2	2	15.123.324	16.963.891	18.691.218	20.380.904	3.123.510	4.960.869	6.051.801	7.027.898
Pekerjaan Pambesian	8	3.934.577,00	7	6	6	6	4.233.406	4.748.627	5.232.150	5.705.137	327.881	520.753	635.270	737.733
Pasangan Pondasi Beton K.250	14	13.334.493,51	12	11	10	10	14.347.240	16.093.354	17.732.039	19.335.016	634.976	1.008.491	1.230.266	1.428.696
Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (Erection works)	26	50.321.442,75	23	21	19	18	54.143.324	60.732.776	66.916.812	72.966.092	1.290.293	2.049.290	2.499.943	2.903.160

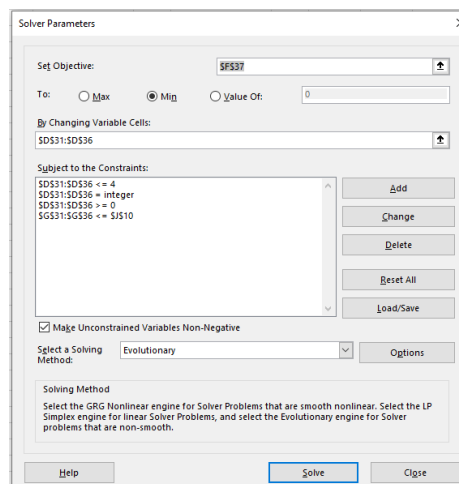
Berdasarkan tabel *cost slope*, penambahan biaya percepatan (*Cost Slope*) menunjukkan pola non-linear. Semakin banyak jam kerja lembur yang ditambahkan, biaya percepatan per hari semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh adanya *fatigue factor* yang menurunkan produktivitas tenaga kerja serta peningkatan pengali upah lembur sesuai regulasi. Sebagai contoh, *Cost Slope* pada pekerjaan Galian Tanah sebesar Rp592.381 untuk lembur 1 jam dan meningkat menjadi Rp1.332.858 pada lembur 4 jam. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa biaya percepatan tidak meningkat secara linier sehingga setiap tambahan jam lembur menghasilkan biaya yang berbeda.

Hasil simulasi penambahan jam kerja lembur 1-4 jam menunjukkan bahwa peningkatan jam lembur mampu memperpendek durasi pekerjaan kritis. Namun, semakin besar jam lembur yang diberikan, biaya percepatan juga semakin meningkat. Selain disebabkan oleh kenaikan upah lembur, adanya faktor kelelahan (*fatigue factor*) menyebabkan tambahan produktivitas yang diperoleh dari setiap jam lembur semakin menurun. Kondisi tersebut menyebabkan nilai *cost slope* pada

setiap tingkat lembur berbeda dan cenderung meningkat, sehingga penambahan jam lembur maksimum pada seluruh pekerjaan tidak selalu menjadi pilihan yang paling efisien.

5.2.3 Mencari Kombinasi Lembur Optimal TCTO

Karena *Cost Slope* bersifat non-linear dan berubah pada setiap penambahan jam lembur, pencarian kombinasi optimal tidak efektif dilakukan secara manual dengan metode *trial and error*. Oleh karena itu, optimasi dilakukan menggunakan algoritma *Evolutionary* pada *Excel Solver*. Model optimasi dirancang untuk menentukan nilai *Cost Slope* secara otomatis berdasarkan jam lembur yang disimulasikan. *Solver* kemudian mencari kombinasi yang menghasilkan pengurangan durasi proyek paling besar dengan batasan bahwa nilai *Cost Slope* tidak boleh melebihi penghematan Biaya Tidak Langsung (*Overhead*) harian, yaitu sebesar Rp683.333/hari.



Gambar 5. 7 Parameter Excel Solver

Langkah-langkah mencari kombinasi yang optimal dengan *Solver*:

1. Menyusun fungsi tujuan (*Set Objective*)

Fungsi tujuan (*Set Objective*) ditetapkan pada sel total durasi proyek dan diatur menjadi Min.

2. Menetapkan sel yang akan diubah (*by changing variable cells*)

Sel yang dapat diubah (*By Changing Variable Cells*) berupa jumlah jam kerja lembur pada setiap aktivitas yang disimulasikan.

3. Menetapkan fungsi kendala (*constraints*)

- Jam Lembur ≥ 0 jam
- Jam Lembur ≤ 4 jam
- Nilai Jam lembur = integer (hasilnya bilangan bulat bukan pecahan)
- $Cost\ Slope \leq Overhead$ harian (Rp 683.333/hari)

Dengan pengaturan tersebut, *Solver* mencari kombinasi jam kerja lembur yang dapat mempersingkat durasi total proyek semaksimal mungkin, tetapi tetap memenuhi batas ekonomis biaya percepatan. Hasil kombinasinya disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 5. 19 Kombinasi Lembur Optimal Hasil Optimasi *Solver*

Aktivitas	Jam Lembur	Biaya Upah	Durasi	Cost Slope
Pengukuran	0	Rp 10.000.000	3	Rp -
Galian	1	Rp 7.648.468	7	Rp 592.381
Batu Pondasi	0	Rp 28.490.000	10	Rp -
Bekisting	0	Rp 14.055.796	3	Rp -
Pembesian	3	Rp 5.232.150	6	Rp 635.270
Beton K250	1	Rp 14.347.240	12	Rp 634.976
Erection	0	Rp 50.321.443	26	Rp -
Total		Rp 130.095.096	67	

Durasi dibulatkan menjadi hari kerja penuh untuk menyesuaikan kondisi pelaksanaan di lapangan dan *input* pada Microsoft Project. Pembulatan ini dilakukan dengan kompensasi melalui peningkatan ritme kerja pada hari terakhir

Berdasarkan hasil optimasi perangkat lunak *Solver*, diperoleh skenario kombinasi percepatan yang paling efisien, yaitu:

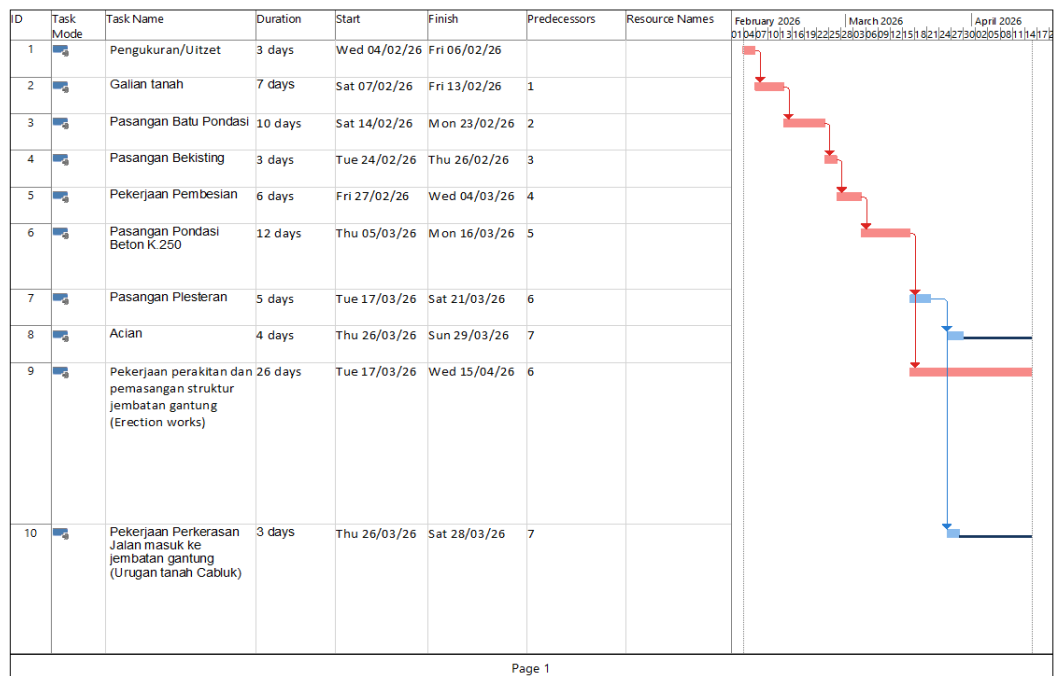
- Galian: *Crashing* dengan lembur 1 jam.
- Pekerjaan Pembesian: *Crashing* dengan lembur 3 jam.
- Beton K250: *Crashing* dengan lembur 1 jam.

Ketiga pekerjaan tersebut dilemburkan untuk setiap harinya sehingga menghasilkan durasi yang tertera dalam tabel hasil optimasi *solver*. Secara operasional di lapangan, jam kerja normal diberlakukan mulai pukul 07.00 WIB hingga 15.00 WIB. Pelaksanaan percepatan waktu atau kerja lembur ini akan dimulai seketika setelah jam kerja normal berakhir.

Berdasarkan skenario kombinasi lembur tersebut, di mana penambahan waktu lembur maksimal adalah 3 jam pada Pekerjaan Pembesian, maka aktivitas pekerjaan proyek di lapangan akan diperpanjang dari pukul 15.00 WIB hingga selambat-lambatnya pukul 18.00 WIB setiap harinya ketika Pekerjaan Pembesian berjalan.

5.2.3.1 Mengecek Dan Membuat Kembali Penjadwalan Baru

Setelah melakukan *crashing*, dilakukan pengecekan agar pekerjaan non kritis tidak berubah menjadi pekerjaan kritis dengan *microsoft project*. Berikut adalah hasil penjadwalan ulang setelah *dicrash* :



Gambar 5. 8 Penjadwalan Baru Setelah Crash

Berdasarkan hasil penjadwalan baru, tidak terdapat pekerjaan non-kritis yang menjadi kritis. Hal ini karena percepatan proyek selama 5 hari tidak mengurangi *Total Float* pekerjaan paralel, seperti Pasangan Plesteran, Acian, dan Pekerjaan Perkerasan Jalan Masuk ke Jembatan Gantung. Dengan demikian, waktu kelonggaran yang tersedia masih mencukupi sehingga percepatan proyek tidak menyebabkan perubahan lintasan kritis.

5.2.3.2 Analisis Durasi dan Biaya Hasil Kombinasi Optimal

A. Analisa Waktu & Biaya Langsung

Setelah dilakukan proses percepatan durasi (*crashing*) menggunakan skenario penambahan jam kerja lembur pada pekerjaan di lintasan kritis, dilakukan analisa terhadap perubahan total durasi serta total biaya proyek.

Tabel 5. 20 Total Durasi & Biaya Langsung

No.	Uraian pekerjaan	Biaya Total RAB (Rp)	Durasi Normal (Hari)	Durasi Akhir (Hari)	Biaya Upah Normal (Rp)	Biaya Material (Rp)	Total Biaya Langsung Normal (Rp)	Biaya Upah Setelah Crash (Rp)	Total Biaya Langsung Crash (Rp)	Perubahan Biaya (Rp)
		a	b	c	d	e	f = a	g	h=e+g	i=h-f
I	Pekerjaan di lintasan Kritis									
1	Pengukuran	10.000.000	3	3	10.000.000,00	-	10.000.000	10.000.000	10.000.000	-
2	Galian Tanah	7.108.576	8	7	7.108.575,75	-	7.108.576	7.648.468	7.648.468	539.892
3	Pasangan Batu Pondasi	132.891.667	10	10	28.490.000,00	104.401.666,67	132.891.667	28.490.000	132.891.667	-
4	Pasangan Bekisting	32.005.665	3	3	14.055.795,60	17.949.869,14	32.005.665	14.055.796	32.005.665	-
5	Pekerjaan Pembesian	48.124.133	8	6	3.934.577,00	44.189.556,33	48.124.133	5.232.150	49.421.707	1.297.573
6	Pasangan Pondasi Beton K.250	95.610.857	14	12	13.334.493,51	82.276.363,64	95.610.857	14.347.240	96.623.603	1.012.746
7	Pekerjaan perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung (Erection works)	547.838.918	26	26	50.321.442,75	497.517.475,00	547.838.918	50.321.443	547.838.918	-
II	Pekerjaan Non Kritis									
1	Pasangan Plesteran	6.426.615	-	-	-	-	6.426.615	-	6.426.615	-
2	Acian	3.478.313	-	-	-	-	3.478.313	-	3.478.313	-
3	Pekerjaan Perkerasan Jalan masuk ke jembatan gantung (Urugan tanah Cabluc)	4.395.823	-	-	-	-	4.395.823	-	4.395.823	-
4	Dokumentasi dan Pelaporan	2.500.000	-	-	-	-	2.500.000	-	2.500.000	-
5	Papan Nama Proyek	150.000	-	-	-	-	150.000	-	150.000	-
6	Prasasti Jembatan 30x40 cm	350.000	-	-	-	-	350.000	-	350.000	-
	Total		72	67		Total	890.880.566	Total	893.730.777	2.850.211

Merujuk pada tabel di atas, perubahan durasi dan biaya langsung hanya terjadi pada pekerjaan-pekerjaan yang berada di lintasan kritis dan terpilih untuk dilemburkan, yaitu:

1. Galian Tanah: Durasi normal berkurang dari 8 hari menjadi 7 hari (lembur 1 jam). Biaya + Rp 539.892
2. Pekerjaan Pembesian: Durasi normal berkurang dari 8 hari menjadi 6 hari (lembur 3 jam). Biaya + Rp 1.297.573
3. Pasangan Pondasi Beton K.250: Durasi normal berkurang dari 14 hari menjadi 12 hari (lembur 1 jam). Biaya + RP 1.012.746

Sedangkan pekerjaan kritis lainnya (seperti Pengukuran/*Uitzet* , Pasangan Batu Pondasi , Pasangan Bekisting , dan *Erection Works*) serta seluruh pekerjaan non-kritis tidak mengalami perubahan durasi maupun penambahan biaya upah lembur. Akibat penambahan upah kerja lembur pada pekerjaan kritis tersebut, terjadi perubahan pada total biaya langsung (*Direct Cost*):

1. Total Durasi Normal (t_n) = 72 hari kerja
2. Total Durasi Setelah *Crash* (t_c) = 67 hari kerja
3. Total Biaya Langsung Normal (DC_n) = Rp 890.880.566
4. Total Biaya Langsung Setelah *Crash* (DC_c) = Rp 893.730.777

Perubahan biaya langsung dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta DC = DC_c - DC_n$$

$$\Delta DC = 893.730.777,00 - 890.880.566 = \text{Rp } 2.850.211$$

(Terjadi kenaikan biaya langsung sebesar Rp 2.850.211 akibat biaya upah lembur)

B. Analisa Biaya Total Proyek

Untuk Biaya total proyek, dihitung dari akumulasi biaya langsung (*Direct Cost*) dan biaya tidak langsung (*Indirect Cost/Overhead*). Karena terdapat 4 hari libur Hari Raya dalam periode pelaksanaan, biaya tidak langsung dihitung berdasarkan durasi hari kerja ditambah hari libur dengan tarif *overhead* harian sebesar Rp 683.333 /hari.

1. Kondisi Normal (Sebelum *Crashing*) :

Durasi Normal (t_n) = 72 hari kerja + 4 hari libur = 76 hari

Biaya Langsung Normal (DC_n) = 890.880.566

Biaya Tidak Langsung (IC_n) :

$$IC_n = t_n * \text{Overhead harian}$$

$$IC_n = 76 * 683.333 = \text{Rp } 51.933.333$$

Total Biaya Normal (TC_n) :

$$TC_n = DC_n + IC_n$$

$$TC_n = 890.880.566 + 51.933.333 = \text{Rp } 942.813.899$$

2. Kondisi Setelah *Crashing*

Durasi *Crashing* (t_c) = 67 hari kerja + 4 hari libur = 71 hari

Biaya Langsung *Crashing* (DC_c) = Rp 893.730.777

Biaya Tidak Langsung (IC_c) :

$$IC_c = t_c * \text{Overhead harian}$$

$$IC_c = 71 * 683.333 = \text{Rp } 48.516.666$$

Total Biaya *Crashing* (TC_c):

$$TC_c = DC_c + IC_c$$

$$TC_c = 893.730.777 + 48.516.666 = \text{Rp } 942.247.444$$

Hasil komparasi dari kedua kondisi tersebut dirangkum dalam tabel di bawah ini:

Tabel 5. 21 Durasi & Biaya Total

Kondisi	Durasi Efektif Kerja (Hari)	Durasi Total (Hari)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tidak Langsung Rp)	Total Biaya (Rp)
	a	b=a+4	c	d=Overhead*b	e=c+d
Normal	72	76	890.880.566	51.933.333	942.813.899
Crashing	67	71	893.730.777	48.516.666	942.247.444

Berdasarkan hasil analisis perbandingan pada Tabel 5.21, dapat ditarik beberapa poin kesimpulan penting terkait percepatan durasi dan penghematan biaya:

1. Perubahan total durasi : $\frac{76-71}{76} = 6,58\%$ (5 hari)
2. Perubahan pada biaya langsung :
 $893.730.777 - 890.880.566 = \text{Rp } 2.850.211$
3. Perubahan pada biaya tidak langsung :
 $48.516.666 - 51.933.333 = - \text{Rp } 3.416.666$
4. Perubahan Biaya total:
 $942.247.444 - 942.813.899 = - \text{Rp } 566.455$

5.3 Pembahasan

5.3.1 Interpretasi Hasil

Berdasarkan hasil identifikasi lintasan kritis menggunakan *Microsoft Project* diperoleh daftar pekerjaan-pekerjaan yang berada di lintasan kritis, yaitu:

1. Pengukuran/*Uitzet* (3 Hari)

2. Galian Tanah (8 Hari)
3. Pasangan Batu Pondasi (10 Hari)
4. Pasangan Bekisting (3 Hari)
5. Pekerjaan Pembesian (8 hari)
6. Pasangan Pondasi K.250 (14 Hari)
7. Pekerjaan Perakitan dan pemasangan struktur jembatan gantung/*Erection Works* (26 Hari)

Total durasi pekerjaan pada lintasan kritis adalah 72 hari kerja efektif. Setelah ditambah 4 hari libur Hari Raya, durasi normal proyek menjadi 76 hari kalender.

Hasil simulasi penambahan jam kerja lembur 1-4 jam per hari menunjukkan bahwa semakin besar jam lembur yang diberikan, durasi pekerjaan semakin pendek. Namun, pengurangan durasi tersebut diikuti oleh peningkatan biaya percepatan. Selain disebabkan oleh kenaikan upah lembur, adanya faktor kelelahan (*fatigue factor*) menyebabkan tambahan produktivitas yang diperoleh semakin menurun seiring bertambahnya jam lembur. Kondisi tersebut menyebabkan nilai *cost slope* pada setiap tingkat lembur berbeda dan cenderung meningkat. Dengan demikian, penambahan jam lembur yang lebih besar tidak selalu memberikan pertukaran waktu dan biaya yang lebih efisien

Hasil analisis *Time Cost Trade-Off* menunjukkan kombinasi lembur yang optimal diperoleh pada tiga pekerjaan kritis, yaitu Galian Tanah selama 1 jam, Pekerjaan Pembesian selama 3 jam, dan Pasangan Beton K.250 selama 1 jam per hari. Kombinasi tersebut mempercepat durasi pekerjaan dari 72 hari kerja menjadi 67 hari kerja. Dengan mempertimbangkan 4 hari libur Hari Raya, durasi kalender proyek berkurang dari 76 hari menjadi 71 hari, sehingga terjadi pengurangan durasi sebesar 5 hari, dengan kata lain durasi total proyek mengalami efisiensi sebanyak 6,58%.

Kombinasi tersebut ditentukan berdasarkan perbandingan antara tambahan biaya percepatan (*Cost Slope*) dan penghematan biaya tidak langsung (*Overhead*) sebesar Rp683.333 per hari. Hasil optimasi *Excel Solver* menunjukkan bahwa lembur hanya diterapkan pada Galian Tanah, Pekerjaan Pembesian, dan Pasangan Pondasi K.250.

Pekerjaan kritis lainnya tidak dipercepat karena *Cost Slope* pada penambahan lembur berikutnya melebihi penghematan *Overhead* harian. Dengan demikian, penambahan lembur lebih lanjut tidak lagi menguntungkan karena biaya percepatan lebih besar daripada penghematan biaya tidak langsung.

Percepatan tersebut meningkatkan biaya langsung sebesar Rp2.850.211, tetapi menurunkan biaya tidak langsung sebesar Rp3.416.666. Selisih tersebut menyebabkan total biaya proyek turun dari Rp942.813.899 menjadi Rp942.247.444, atau berkurang sebesar Rp566.455. Dengan demikian, kombinasi lembur yang diperoleh dapat mempercepat proyek selama 5 hari sekaligus menurunkan total biaya proyek.

Berbeda dengan metode TCTO konvensional yang melakukan perhitungan percepatan secara bertahap, penelitian ini menggunakan algoritma *Evolutionary* pada *Excel Solver* untuk mencari kombinasi jam lembur yang menghasilkan biaya dan durasi optimal. *Solver* mengevaluasi berbagai kombinasi variabel berdasarkan fungsi tujuan dan batasan yang telah ditentukan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa titik optimal diperoleh pada durasi 71 hari kalender dengan total biaya sebesar Rp942.247.444. Dengan demikian, kombinasi lembur tersebut merupakan alternatif percepatan yang paling optimal yang digunakan dalam penelitian ini.

5.3.2 Relevansi Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Priyo & Paridi (2018) dan Ezra et al. (2023). Keduanya sama-sama membuktikan bahwa menambah jam lembur pada pekerjaan kritis dapat mempercepat proyek, meskipun ada tambahan biaya upah yang harus dibayar. Selain itu, penelitian ini juga membenarkan bahwa faktor kelelahan (*fatigue factor*) perlu diperhitungkan agar hasil waktunya tidak meleset dari kondisi asli di lapangan. Terkait penggunaan alat bantu hitung, penelitian ini mendukung hasil dari Citra et al. (2019) serta Tanurahardja & Gondokusumo (2022). Terbukti bahwa Microsoft *Excel Solver* dapat digunakan untuk mencari jadwal proyek yang paling murah dan cepat, terutama ketika ada banyak batasan syarat (*constraints*) yang harus dipenuhi secara bersamaan.

5.3.3 Kaitan Hasil dengan Landasan Teori

Hasil penelitian sesuai dengan konsep *Time Cost Trade-Off*, yaitu percepatan waktu menyebabkan perubahan biaya langsung dan biaya tidak langsung. Titik optimal tercapai ketika tambahan biaya percepatan masih lebih rendah dibandingkan penghematan *overhead* Rp683.333/hari.

Selain itu, simulasi ini sangat sesuai dengan aturan hukum dan teori yang berlaku. Batas maksimal lembur 4 jam per hari yang dimasukkan ke *Solver* mematuhi aturan (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 35 Tahun 2021 Tentang Perjanjian Kerja Waktu Tertentu, Alih Daya, Waktu Kerja Dan Waktu Istirahat, Dan Pemutusan Hubungan Kerja, 2021). Cara menghitung upah lembur yang bertingkat, ditambah adanya hitungan faktor kelelahan (*fatigue factor*), juga membenarkan teori Soeharto (1997). Teori tersebut menyebutkan bahwa kemampuan fisik pekerja terbatas dan hasil kerjanya pasti menurun sekitar 0,1 poin untuk setiap tambahan jam lembur.

5.3.4 Temuan Penelitian dan Analisis Perbedaan

Penelitian ini menemukan bahwa nilai *Cost Slope*, yaitu tambahan biaya percepatan per hari, bersifat tidak linier. Hasil ini berbeda dengan beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan *Cost Slope* konstan pada setiap tingkat percepatan.

Adapun perbedaan-perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu:

1. Penelitian Barotho & Shofwan (2025), Valdiano et al. (2025), Yahya & Beatrix (2025), Lutfi et al. (2025), dan Nakti et al. (2024) hanya melakukan analisis TCTO konvensional. Kelima penelitian tersebut tidak memasukkan faktor kelelahan pekerja (*fatigue factor*) ke dalam perhitungan percepatannya. Demikian pula dengan penelitian Citra et al. (2019) dan Tanurahardja & Gondokusumo (2022). Walaupun mereka menggunakan perangkat lunak *Solver* untuk mencari kombinasi yang optimal, mereka tetap mengasumsikan produktivitas pekerja selalu konstan berapa pun lama waktu lemburnya. Sebaliknya, dalam penelitian ini, pekerja mengalami kelelahan yang menurunkan produktivitas.

2. Penelitian ini melengkapi kelemahan pada penelitian Kisworo et al. (2017), Priyo & Paridi (2018), dan Ezra et al. (2023). Ketiga penelitian tersebut sebenarnya sudah memperhitungkan faktor kelelahan pekerja (*fatigue factor*). Akan tetapi, peneliti mencari titik biaya paling optimal menggunakan perhitungan manual atau *trial and error*. Karena biaya percepatan selalu berubah (*non-linear*), pencarian manual tersebut menjadi kurang efektif. Oleh karena itu, penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan algoritma *Evolutionary* pada *Microsoft Excel Solver* sangat efektif untuk mencari kombinasi jam lembur yang paling optimal secara otomatis dan akurat.

5.3.5 Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memberikan acuan bagi pelaksana proyek dalam menangani keterlambatan. Penambahan jam kerja lembur dapat dilakukan selama tambahan biaya langsung (*Cost Slope*) masih lebih rendah daripada penghematan biaya *overhead* harian sebesar Rp683.333,00. Batas tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat lembur agar percepatan tetap memberikan efisiensi biaya. Dengan demikian, proyek dapat diselesaikan lebih cepat tanpa meningkatkan total biaya proyek.

5.3.6 Limitasi dan Kekurangan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa batasan/kekurangan dalam pelaksanaannya, yaitu:

1. Skenario percepatan hanya menggunakan penambahan jam kerja lembur harian, lalu tenaga kerja harus melakukan lembur setiap hari selama pekerjaan yang dipercepat berlangsung. Penelitian ini juga tidak membandingkan metode tersebut dengan alternatif lain, seperti penambahan tenaga kerja, alat, atau perubahan metode konstruksi.
2. Simulasi ini mengasumsikan kondisi proyek di lapangan berjalan dengan stabil dan terkendali. Peneliti belum memasukkan faktor-faktor gangguan eksternal ke dalam model perhitungan. Faktor gangguan di luar hal teknis tersebut meliputi potensi cuaca ekstrem, fluktuasi harga material di pasaran, serta kendala logistik pengiriman material ke lokasi jembatan.