

Penggunaan Metode *Time Cost Trade Off* Berbasis Algoritma Genetika

Didi Herianto Mahendra, Akhmad Aminullah*, Toriq Arif Ghuzdewan

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Optimasi Jadwal, GA,
Percepatan Proyek, Konstruksi
Abutment, Metode TCTO

*Correspondence email:

akhmadaminullah@ugm.ac.id

Submitted: 11 Januari 2026

Revised: 10 Agustus 2026

Accepted: 10 Agustus 2026

Published: 13 Agustus 2026

ABSTRAK

Salah satu tantangan utama dalam manajemen proyek konstruksi adalah menyeimbangkan antara durasi pelaksanaan dan total biaya proyek. *Time Cost Trade Off* (TCTO) merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara waktu dan biaya dalam upaya mendapatkan kombinasi paling efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan penerapan metode TCTO dengan pendekatan algoritma genetika (GA) sebagai salah satu teknik optimasi. Hasil analisa menunjukkan bahwa percepatan durasi pekerjaan dapat mempengaruhi biaya proyek. Analisis grafik *direct cost* dan *indirect cost* dengan metode *Time Cost Trade Off* membuktikan bahwa percepatan waktu menyebabkan kenaikan biaya langsung dan penurunan biaya tidak langsung, sehingga diperlukan keseimbangan antara keduanya guna mencapai efisiensi proyek. Dengan hasil ini, menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menyajikan alternatif solusi yang efisien secara simultan, sehingga dapat digunakan sebagai acuan pengambilan keputusan dalam tahap perencanaan proyek. Alhasil, Genetic Algorithm (GA) terbukti sebagai metode yang praktis dan aplikatif dalam menyelesaikan permasalahan *Time Cost Trade Off* pada proyek konstruksi.

ABSTRACT

Keywords:

Schedule Optimization, GA,
Project Acceleration,
Abutment Construction, TCTO
Method

One of the main challenges in construction project management is balancing implementation duration and total project cost. *Time-Cost Trade-Off* (TCTO) is a method used to analyze the relationship between time and cost in an effort to find the most efficient combination. This study aims to present the application of the TCTO method with a genetic algorithm (GA) approach as an optimization technique. The analysis results indicate that accelerating work duration can affect project costs. Analysis of direct and indirect cost graphs using the *Time-Cost Trade-Off* method demonstrates that accelerating time causes an increase in direct costs and a decrease in indirect costs, thus requiring a balance between the two to achieve project efficiency. These results demonstrate that this approach is capable of simultaneously presenting efficient alternative solutions and can be used as a reference for decision-making in the project planning stage. Consequently, the Genetic Algorithm (GA) has proven to be a practical and applicable method for solving *Time-Cost Trade-Off* problems in construction projects.

PENDAHULUAN

Dalam dunia konstruksi dan manajemen proyek, keterbatasan waktu dan anggaran merupakan dua faktor utama yang harus dikelola secara efektif (Yuwono & Setiawan, 2023). Penjadwalan proyek yang efisien tidak hanya bertujuan untuk menyelesaikan pekerjaan sesuai target waktu, tetapi juga untuk meminimalkan biaya yang dikeluarkan (Dirgiantara & Sutantiningrum, 2024). Namun, dalam praktiknya, percepatan durasi proyek seringkali memerlukan tambahan biaya, sementara pengurangan biaya dapat berisiko memperpanjang waktu penyelesaian. Tantangan inilah yang dikenal dengan istilah *Time Cost Trade Off* (TCTO), yaitu proses mencari keseimbangan optimal antara waktu dan biaya dalam pelaksanaan proyek. Menurut Nurazizah et al. (2023), *Time Cost Trade Off* adalah teknik dalam penjadwalan proyek yang bertujuan untuk menentukan kombinasi waktu dan biaya yang paling efisien melalui analisis jalur kritis. Penerapan metode ini pada proyek gedung juga telah dibuktikan dapat menghasilkan alternatif percepatan durasi dengan tambahan biaya yang masih dapat diterima (Priyo & Aulia, 2016).

Saputro (2025) menambahkan bahwa konsep ini biasanya diaplikasikan ketika proyek mengalami percepatan (*crashing*), yang mana memperpendek durasi aktivitas akan meningkatkan biaya langsung, tetapi dapat mengurangi biaya tidak langsung dan mempercepat penyelesaian proyek. Oleh karena itu, identifikasi aktivitas-aktivitas kritis dan analisis hubungan antara biaya dan waktu menjadi aspek penting dalam strategi manajemen proyek. Selanjutnya, menurut Zahir (2021), *Time Cost Trade Off* (TCTO) merupakan metode analisis dalam manajemen proyek yang membahas hubungan antara waktu dan biaya dimana dalam pelaksanaan proyek, percepatan waktu sering diperlukan, namun berdampak pada peningkatan biaya langsung dan penurunan biaya tidak langsung. Oleh karena itu, penting untuk menyeimbangkan keduanya agar proyek dapat diselesaikan lebih cepat dengan biaya yang efisien. TCTO membantu manajer proyek menentukan strategi percepatan yang tepat tanpa menggunakan sumber daya secara berlebihan (Juniawan, 2024).

TCTO merupakan metode untuk mempercepat durasi proyek dengan mempertimbangkan pertukaran antara waktu dan biaya yang mencakup proses identifikasi jalur kritis, perhitungan cost slope, dan percepatan aktivitas prioritas (Kurniawan, 2015). Metode Time Cost Trade Off (TCTO) terdiri dari beberapa tahapan utama yang dilakukan secara sistematis untuk mencapai percepatan proyek dengan biaya seefisien mungkin. Tahap pertama adalah identifikasi jalur kritis (critical path), yaitu menentukan rangkaian aktivitas terpanjang dalam proyek yang mempengaruhi total durasi proyek (Fauzananda, 2025). Kedua adalah perhitungan cost slope, yaitu mengukur tambahan biaya yang harus dikeluarkan untuk mempercepat satu hari durasi suatu aktivitas (Sofia & Putri, 2021). Tahap selanjutnya melibatkan percepatan aktivitas di jalur kritis dengan cost slope terkecil secara bertahap dan berulang hingga tercapai target durasi, sehingga membantu pengambilan keputusan tepat dalam efisiensi waktu dan biaya proyek (Utari et al. 2022).

Menurut Wang et al. (2021), untuk menyelesaikan permasalahan TCTO secara efektif, dibutuhkan metode optimasi yang mampu menangani kompleksitas dan berbagai kemungkinan solusi. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat dan telah banyak digunakan dalam berbagai bidang adalah *Genetic Algorithm* (GA). *Genetic Algorithm* pertama kali diperkenalkan oleh John Holland pada tahun 1975 sebagai bagian dari penelitian dalam bidang kecerdasan buatan dan sistem adaptif (Simamora, 2024). *Genetic Algorithm* merupakan metode komputasi evolusioner yang meniru proses seleksi alam dalam biologi, yaitu proses evolusi yang berlangsung melalui seleksi, crossover (persilangan), dan mutasi (Aristyono et al., 2024). Salman et al. (2023) juga menyatakan bahwa algoritma ini bekerja dengan membentuk populasi awal (solusi acak), kemudian memperbaiki solusi tersebut secara bertahap melalui proses seleksi, crossover, dan mutasi. *Genetic Algorithm* bekerja dengan cara mengubah masalah menjadi kode biner, membuat kumpulan solusi awal secara acak, mengevaluasi kecocokan tiap solusi, memilih yang terbaik untuk disilangkan dan dimutasi, lalu mengulangi proses ini hingga ditemukan solusi yang paling optimal. Sumadireja, et al. (2020), mengemukakan bahwa GA digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah kompleks dalam proyek konstruksi seperti optimasi multi-objektif (biaya, waktu, dan kualitas), logistik material, serta estimasi risiko. Studi dari Syahada et al. (2024) menunjukkan bahwa GA mampu menghasilkan solusi lebih cepat dibandingkan metode konvensional, menjadikannya alat yang efektif dan efisien dalam perencanaan proyek.

Dalam konteks TCTO, algoritma ini bekerja dengan menghasilkan populasi solusi awal yang terdiri dari kombinasi waktu dan biaya, lalu secara bertahap memperbaiki solusi tersebut hingga ditemukan solusi terbaik atau mendekati optimal (Krisnandi & Agung, 2017). GA digunakan untuk mencari kombinasi optimal percepatan aktivitas yang menghasilkan total biaya paling efisien dengan durasi yang lebih singkat, melalui proses seleksi, crossover, dan mutasi terhadap populasi solusi yang merepresentasikan alternatif durasi proyek, hingga diperoleh hasil optimal (Muzdalifah et al., 2019). Studi dari Septianus et al. (2014) membuktikan bahwa pendekatan dengan algoritma genetika sangat efektif untuk kasus TCTO yang kompleks, karena GA tidak membutuhkan turunan matematis, mampu menangani banyak variabel, dan dapat mengeksplorasi ruang solusi yang luas dengan cepat. Metode TCTO) dan GA dapat diintegrasikan untuk meningkatkan pengambilan keputusan dalam pengelolaan proyek yang kompleks. TCTO sangat efektif dalam menangani hubungan linier antara waktu dan biaya ketika manajer proyek harus mengejar tenggat waktu yang ketat tanpa menyebabkan lonjakan biaya proyek secara signifikan (Ammar, 2020). Sebaliknya, GA menawarkan pendekatan yang lebih fleksibel dan kuat untuk mengoptimalkan masalah non-linier dan kombinatorial yang sulit diselesaikan dengan metode deterministik tradisional yang menjadikan GA sangat cocok untuk menyelesaikan permasalahan konstruksi yang kompleks seperti optimasi multi-objektif (melibatkan waktu, biaya, kualitas, dan sumber daya), perencanaan logistik material, serta estimasi risiko, di mana variabel-variabel saling berinteraksi dengan cara yang tidak terduga dan sangat dinamis (Ali & Naeem, 2022). Ketika kedua metode ini dikombinasikan, TCTO dapat menjadi dasar dalam optimalisasi jadwal dengan fokus pada pertukaran langsung waktu dan biaya pada aktivitas kritis, sementara GA menyempurnakan solusi dengan mempertimbangkan berbagai variabel dan tujuan lain yang mencerminkan ketidakpastian serta kendala dunia nyata. Integrasi keduanya memberikan kerangka kerja yang lebih menyeluruh dalam mengoptimalkan kinerja proyek, meningkatkan akurasi, efisiensi, dan adaptabilitas dalam mencapai tujuan proyek secara keseluruhan. Kemampuan ini membantu manajer proyek tidak hanya mempercepat jadwal secara efisien, tetapi juga mampu beradaptasi dalam menghadapi skenario kompleks yang melibatkan banyak keputusan saling berkaitan.

Penelitian ini menyajikan penerapan metode *Time Cost Trade Off* (TCTO) menggunakan pendekatan *Genetic Algorithm* (GA). Tujuannya adalah untuk menunjukkan bagaimana GA dapat mengoptimalkan penjadwalan proyek dengan mengidentifikasi kombinasi waktu dan biaya yang efisien melalui skenario konstruksi simulatif. Model yang digunakan menekankan fleksibilitas dan kemampuan sistematis GA dalam mendukung pengambilan keputusan perencanaan proyek.

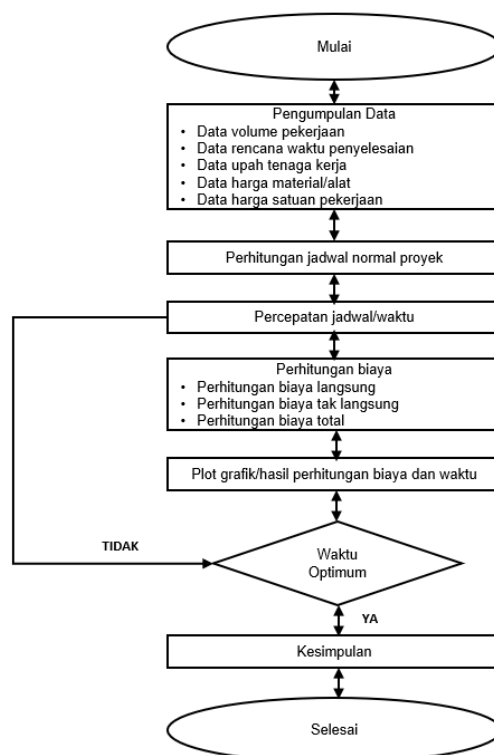
METODE

Penelitian ini menerapkan metode *Time Cost Trade Off* (TCTO) menggunakan pendekatan algoritma genetika. Penelitian ini tidak berfokus pada studi kasus, melainkan bertujuan memberikan pemahaman teknis mengenai prosedur perhitungan dan proses optimasi yang dapat diterapkan secara umum dalam perencanaan proyek konstruksi. Data yang

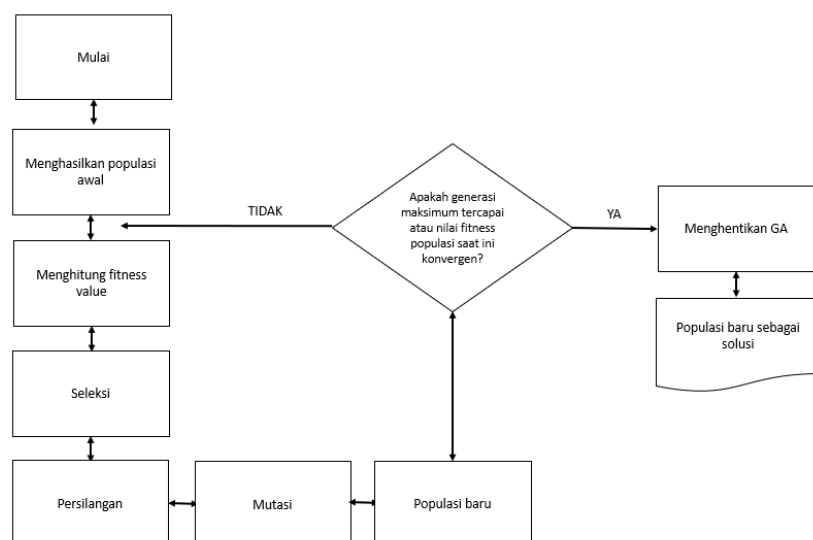
digunakan merupakan data disusun secara hipotetis dimana setiap aktivitas dalam pekerjaan proyek diasumsikan memiliki durasi serta biaya.

Metode Analisis

Dalam penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan analisis, dimulai dari perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk setiap aktivitas pekerjaan abutment, penyusunan diagram keterkaitan kegiatan menggunakan metode Precedence Diagram (PDM), dan identifikasi jalur kritis melalui Critical Path Method (CPM). Selanjutnya, dilakukan analisis percepatan durasi (crash duration) melalui penambahan jam lembur, serta perhitungan biaya percepatan (crash cost) dan kemiringan biaya (cost slope) guna mengetahui efisiensi percepatan. Biaya proyek dikelompokkan menjadi biaya langsung dan tidak langsung, di mana total biaya menjadi fungsi dari perubahan durasi proyek. Seluruh data yang telah dihitung kemudian dimasukkan ke dalam pemodelan *Time Cost Trade Off* (TCTO), yang diselesaikan menggunakan pendekatan *Genetic Algorithm* (GA).



Gambar 1. Bagan Alur *Time Cost Trade Off*



Gambar 2. Bagan Alur *Genetic Algorithm*

HASIL

Sebagai bentuk dari penerapan metode *Time Cost Trade Off* berbasis algoritma genetika, berikut disajikan contoh perhitungan sederhana yang menggunakan data yang disusun untuk menunjukkan bagaimana langkah-langkah teknis dalam analisis TCTO dilakukan secara umum agar dapat memahami cara menghitung cost slope, menentukan jalur kritis, serta bagaimana algoritma genetika dapat digunakan untuk menemukan kombinasi durasi dan biaya proyek yang optima.

Perhitungan RAB Proses Pekerjaan Abutment

Sebelum pekerjaan ditawarkan kepada owner, kontraktor membuat RAB (Rancangan Anggaran Biaya) terlebih dahulu yang disebut dengan Normal Cost (Assyura & Khoiri, 2023). Proses pekerjaan abutment ini memakan waktu normal 69 hari. Perhitungan RAB dimulai dari membuat AHSP pekerjaan dengan Persamaan 3.1 berikut:

$$\text{Normal Cost} = \text{Harga Satuan Pekerjaan (HSP)} \times \text{Volume pekerjaan} \quad (3.1)$$

Diketahui:

- Jumlah harga tenaga = koefisien tenaga $\times$ harga satuan
- Jumlah harga bahan = koefisien bahan $\times$ harga satuan
- Jumlah harga alat = koefisien alat $\times$ harga satuan
- Total harga = $a + b + c$
- Profit / Overhead (10%) = $d \times 10\%$
- Harga satuan = $d + e$
- Normal cost = Menggunakan Persamaan (3.1)

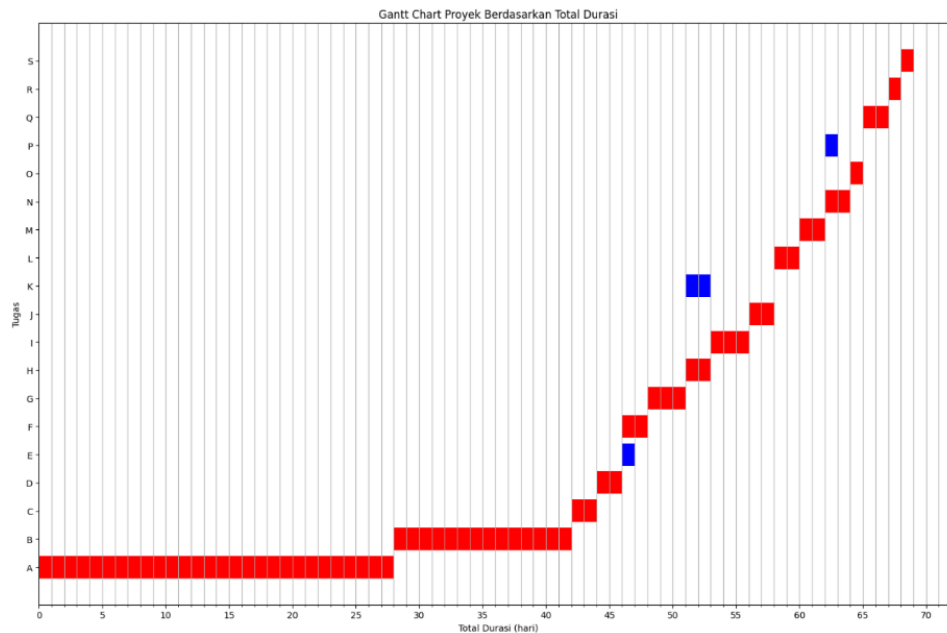
Hasil perhitungan semua kegiatan yang telah dihitung dirangkum dalam tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Tabel biaya pada setiap item kegiatan

Code	Item	Satuan	HSP	Volume	Cost
A	Pekerjaan Borpile 800 mm	M1	Rp7.986.533,12	216	Rp1.725.091.152,84
B	Pekerjaan Galian struktur	M3	Rp180.937,85	482	Rp87.212.041,29
C	Pekerjaan Urukan Pasir	M3	Rp116.985,70	5,8	Rp678.517,08
D	Pekerjaan Cor Lantai Kerja	M3	Rp1.584.588,93	5,8	Rp9.190.615,79
E	Pengujian Csl	Buah	Rp12.100.000,00	3	Rp36.300.000,00
F	Pengujian Pdlt	Buah	Rp10.900.000,00	3	Rp32.700.000,00
G	Pembesian Footing Abutment	Kg	Rp15.846,78	7701,771	Rp122.048.239,84
H	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	M1	Rp383.039,36	23,2	Rp8.886.513,15
I	Pembesian Badan Abutment	Kg	Rp15.846,78	7426,479	Rp117.685.749,18
J	Pembesian Wingwall Abutment	Kg	Rp15.846,78	1742,975	Rp27.620.534,40
K	Pemasangan Thermocouple Footing	Buah	Rp172.826,41	15	Rp2.592.396,18
L	Pengecoran Footing Mass Concreat Fc' 35 Mpa	M3	Rp2.575.652,40	69,6	Rp179.265.406,90
M	Pembesian Kepala Abutment	Kg	Rp15.846,78	2401,205	Rp38.051.357,77
N	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	M1	Rp383.039,36	11,6	Rp4.443.256,58
O	Pengecoran Badan Abutment Fc' 35 Mpa	M3	Rp2.592.068,30	17,4	Rp45.101.988,47
P	Pemasangan Thermocouple Kepala Abutment	Buah	Rp172.826,41	7	Rp1.209.784,88
Q	Pengecoran Kepala Abutment Mass Concreat Fc' 35 Mpa	M3	Rp2.575.652,40	25,23	Rp64.983.710,00
R	Pengecoran Wingwall Abutment Fc'35 Mpa	M3	Rp2.592.068,30	12,569	Rp32.579.706,50
S	Pembukaan Bekisting Abutment	M2	Rp15.846,78	270	Rp4.278.629,52
TOTAL					Rp2.539.919.600,37

Predecessor Diagrams

Penjadwalan kegiatan rinci dalam diagram umumnya dilakukan menggunakan komputer dengan waktu dinyatakan dalam bentuk tanggal kalender atau hari kerja berakhir. Proses penjadwalan dibuat dengan program python. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk menentukan waktu penyelesaian ereksi baja secara keseluruhan dan rentang waktu dimana setiap kegiatan harus diselesaikan sesuai tanggal yang ditentukan (Bourne & Weaver, 2018). Hasil penjadwalan menggunakan program python dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 3. Ganchart pekerjaan abutment
(Sumber: Dokumentasi pribadi)

Hasil dari predecessor diagram adalah lintasan kritis. Perhitungan lintasan kritis. Terdapat lima jenis waktu yang mewakili setiap aktivitas. Terdapat lima jenis waktu yang mewakili setiap aktivitas. Early Start (ES) adalah waktu paling awal dimana kegiatan tersebut dapat dimulai, memungkinkan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan kegiatan sebelumnya. Early Finish (EF) adalah waktu paling awal yang memungkinkan aktivitas tersebut diselesaikan dan ditentukan dengan menambahkan durasi aktivitas tersebut dengan Early start aktivitas itu sendiri. Late Finish (LF) adalah paling akhir yang dapat diselesaikan dengan memungkinkan seluruh proyek untuk diselesaikan pada waktu atau tanggal yang ditentukan. Duration (D) adalah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu jenis aktivitas proyek. Latest Start (LS) adalah waktu paling terlambat yang memungkinkan aktivitas itu dapat dimulai jika tanggal penyelesaian target proyek harus dipenuhi dan diperoleh dengan mengurangi durasi kegiatan dari waktu selesai paling akhir (Messah et al., 2023). Berdasarkan predecessor diagram, Hasil perhitungan ES, EF, LS, dan LF ditunjukkan pada Tabel 2 dibawah ini:

Tabel 2. Tabel ES, EF, LS, LF

Code	Item	Precedent	Duration (Days)	ES (Days)	EF (Days)	LS (Days)	LF (Days)
A	Pekerjaan Borpile	-	28	0	28	0	28
B	Pekerjaan Galian Struktur	A	14	28	42	28	42
C	Pekerjaan Urukan Pasir	B	2	42	44	42	44
D	Pekerjaan Cor Lantai Kerja	C	2	44	46	44	46
E	Pengujian Csl	D	1	46	47	47	48
F	Pengujian Pdlt	D	2	46	48	46	48
G	Pembesian Footing Abutment	E, F	3	48	51	48	51
H	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	G	2	51	53	51	53
I	Pembesian Badan Abutment	H	3	53	56	53	56
J	Pembesian Wingwall Abutment	I	2	56	58	56	58
K	Pemasangan Thermocouple Footing	G	2	51	53	56	58
L	Pengecoran Footing Mass Concreat Fc' 35 Mpa	J, K	2	58	60	58	60
M	Pembesian Kepala Abutment	L	2	60	62	60	62
N	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	M	2	62	64	62	64
O	Pengecoran Badan Abutment Fc' 35 Mpa	N	1	64	65	64	65
P	Pemasangan Thermocouple Kepala Abutment	M	1	62	63	64	65
Q	Pengecoran Kepala Abutment Mass Concreat Fc' 35 Mpa	O, P	2	65	67	65	67
R	Pengecoran Wingwall Abutment Fc'35 Mpa	Q	1	67	68	67	68
S	Pembukaan Bekisting Abutment	R	1	68	69	68	69

Jalur Kritis

Setelah menghitung ES, EF, LS, dan LF. Lintasan kritis dapat didapatkan pada setiap aktivitas dengan menghitung total *float*. Rumus total *float* dapat diperoleh dari Persamaan 4.2

$$TF = \text{Late Finish (LF)} - \text{Early Finish (EF)} = 0 \quad (4.2)$$

Perhitungan total float dilakukan pada setiap aktivitas, apabila ditemukan aktivitas yang memiliki nilai Total *Float* tidak sama dengan 0, maka tidak dianggap sebagai lintasan kritis. Hasil perhitungan lintasan kritis dapat dilihat pada Tabel. 3 dibawah ini:

Tabel 3 Hasil analisa aktivitas kritis

CODE	Pekerjaan	Precedent	TF	Critical
A	Pekerjaan Borpile	-	0	CRITICAL
B	Pekerjaan Galian Struktur	A	0	CRITICAL
C	Pekerjaan Urukan Pasir	B	0	CRITICAL
D	Pekerjaan Cor Lantai Kerja	C	0	CRITICAL
E	Pengujian Csl	D	1	TIDAK CRITICAL
F	Pengujian Pdlt	D	0	CRITICAL
G	Pembesian Footing Abutment	E, F	0	CRITICAL
H	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	G	0	CRITICAL
I	Pembesian Badan Abutment	H	0	CRITICAL
J	Pembesian Wingwall Abutment	I	0	CRITICAL
K	Pemasangan Thermocouple Footing	G	5	TIDAK CRITICAL
L	Pengecoran Footing Mass Concreat Fc' 35 Mpa	J, K	0	CRITICAL
M	Pembesian Kepala Abutment	L	0	CRITICAL
N	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	M	0	CRITICAL
O	Pengecoran Badan Abutment Fc' 35 Mpa	N	0	CRITICAL
P	Pemasangan Thermocouple Kepala Abutment	M	2	TIDAK CRITICAL
Q	Pengecoran Kepala Abutment Mass Concreat Fc' 35 Mpa	O, P	0	CRITICAL
R	Pengecoran Wingwall Abutment Fc'35 Mpa	Q	0	CRITICAL
S	Pembukaan Bekisting Abutment	R	0	CRITICAL

Menghitung *Crash Duration* dari Jam Lembur

Kebijakan jam lembur yang diatur oleh PT. Billiton Hero Sukses Cemerlang mengikuti standar lembur Undang-undang tenaga kerja sebagai berikut:

- Jam kerja normal : 07.00 - 16.00 / 8 jam kerja
- Jam istirahat : 12.00 - 13.00
- Jam Lembur : 16.00 - 20.00 / 4 jam
- Koefisien Lembur : 0,8

Rumus menentukan crash duration ditunjukkan pada persamaan 4.3 berikut:

$$\text{Crash duration} = \frac{\text{volume pekerjaan}}{\text{produktifitas crash}} \quad (4.3)$$

Dimana produktifitas crash dihitung dengan persamaan 4.4 berikut:

$$\text{Produktifitas crash} = (\text{jam kerja normal} \times \text{Prod normal}) + (\text{jam lembur} \times \text{koef} \times \text{Prod normal}) \quad (4.4)$$

dan produktifitas normal dihitung dengan persamaan 4.5 berikut:

$$\text{Prod normal} = \frac{\text{volume pekerjaan}}{\text{durasi (jam)}} \quad (4.5)$$

Hasil perhitungan semua item pekerjaan dihitung dengan Microsoft exel dengan hasil yang dirangkum pada tabel 4 dibawah ini:

Tabel 4. Hasil perhitungan *crash duration*

CODE	Satuan	Volume (m ³)	Prod N (m ³ /jam)	Prod Cr (m ³ /jam)	Crash Dur (hari)
A	M3	216	0,96	10,80	20
B	M1	482	4,30	48,20	10
C	M3	5,8	0,36	4,06	1
D	M3	5,8	0,36	4,06	1
E	Buah	3	0,38	4,20	1
F	Buah	3	0,19	2,10	1
G	Kg	7701,771	320,91	3594,16	2
H	M1	23,2	1,45	16,24	1
I	Kg	7426,479	309,44	3465,69	2
J	Kg	1742,975	108,94	1220,08	1
K	Buah	15	0,94	10,50	1

Tabel 4. Hasil perhitungan *crash duration* (Lanjutan)

CODE	Satuan	Volume (m ³)	Prod N (m ³ /jam)	Prod Cr (m ³ /jam)	Crash Dur (hari)
L	M3	69,6	4,35	48,72	1
M	Kg	2401,205	150,08	1680,84	1
N	M1	11,6	0,73	8,12	1
O	M3	17,4	2,18	24,36	1
P	Buah	7	0,88	9,80	1
Q	M3	25,23	1,58	17,66	1
R	M3	12,569	1,57	17,60	1
S	M2	270	33,75	378,00	1

Menghitung *Crash Cost* akibat percepatan

Crash cost dihasilkan dari penjumlahan upah pekerja harian normal dengan upah lembur lebur kemudian dikalikan dengan durasi *crash*. Total *crash cost* adalah jumlah antara biaya penambahan jam kerja lembur dan normal. Dengan adanya percepatan durasi pada pelaksanaan pada aktivitas tertentu, maka akan terjadi pertambahan biaya akibat percepatan durasi. Pertambahan biaya tersebut tergantung dari besarnya durasi percepatan yang direncanakan serta total biayasetelah percepatan, semakin besar *crash cost*, maka akan semakin besar pula nilai *cost slopenya*. Menurut Keputusan Menteri Tenaga Kerja No. KEP.102/MEN/VI/2004 pasal 3, pasal 7 dan pasal 11 standar upah untuk lembur adalah:

1. Waktu kerja lembur hanya dapat dilakukan paling banyak 4 (jam) dalam 1 (satu) hari dan 14 (empat belas) jam dalam 1 (satu) minggu.
2. Memberikan makanan dan minuman sekurang-kurangnya 1.400 kalori apabila kerja lembur dilakukan selama 3 jam atau lebih.
3. Untuk kerja lembur untuk setiap jam kerja harus dibayar upah sebesar 2 kali lipat upah satu jam.

Rumus *crash cost* dapat dihitung dengan mengetahui Harga Satuan Pekerjaan (HSP). Hasil perhitungan HSP yang sudah dihitung sebelumnya, digunakan untuk menghitung upah pekerja/jam (up) dengan Persamaan 4.6

$$\text{Crash Cost} = \text{Normal cost} + (\text{biaya lembur} \times \text{Crash duration}) \quad (4.6)$$

Peritungan seluruh *crash cost* pada setiap item pekerjaan dihitung dengan Microsoft exel dengan ketentuan yang sesuai dengan contoh yang ditampilkan pada perhitungan *crash cost* diatas, kemudian dirangkum dalam tabel 5 dibawah ini:

Tabel 5. Hasil perhitungan *crash cost*

CODE	Normal		Crash	
	Durasi	Cost	Durasi	Cost
A	28	Rp1.725.091.152,84	20	Rp2.021.979.812,04
B	14	Rp87.212.041,29	10	Rp94.665.267,09
C	2	Rp678.517,08	1	Rp1.736.230,11
D	2	Rp9.190.615,79	1	Rp16.433.471,33
E	1	Rp36.300.000,00	1	Rp44.942.857,14
F	2	Rp32.700.000,00	1	Rp48.271.428,57
G	3	Rp122.048.239,84	2	Rp122.087.703,55
H	2	Rp8.886.513,15	1	Rp10.001.636,94
I	3	Rp117.685.749,18	2	Rp117.725.212,89
J	2	Rp27.620.534,40	1	Rp27.646.843,54
K	2	Rp2.592.396,18	1	Rp3.539.858,75
L	2	Rp179.265.406,90	1	Rp188.101.029,47
M	2	Rp38.051.357,77	1	Rp38.077.666,91
N	2	Rp4.443.256,58	1	Rp5.558.380,37
O	1	Rp45.101.988,47	1	Rp49.218.729,99
P	1	Rp1.209.784,88	1	Rp1.683.516,17
Q	2	Rp64.983.710,00	1	Rp73.819.332,57
R	1	Rp32.579.706,50	1	Rp36.696.448,02
S	1	Rp4.278.629,52	1	Rp4.313.369,81

Menghitung *Cost Slope*

Cost slope adalah perbandingan antara biaya yang dikeluarkan dengan waktu normal dan waktu percepatannya. *Cost slope* (CS) dihitung dengan Persamaan 4.7

$$CS = \frac{\text{Cost Crash} - \text{Cost Normal}}{\text{Durasi Awal} - \text{Durasi Akhir}} \quad (4.7)$$

Berikut hasil perhitungan *cost slope* dengan persamaan 4.7 pada setiap item pekerjaan yang dirangkum dalam tabel 6

Tabel 6. Hasil perhitungan *cost slope*

CODE	Normal		Crash		Cost Slope
	Durasi	Cost	Durasi	Cost	
A	28	Rp1.725.091.152,84	20	Rp2.021.979.812,04	Rp212.063.328,00
B	14	Rp87.212.041,29	10	Rp94.665.267,09	Rp5.323.732,71
C	2	Rp678.517,08	1	Rp1.736.230,11	Rp755.509,31
D	2	Rp9.190.615,79	1	Rp16.433.471,33	Rp5.173.468,24
E	1	Rp36.300.000,00	1	Rp44.942.857,14	Rp6.173.469,39
F	2	Rp32.700.000,00	1	Rp48.271.428,57	Rp11.122.448,98
G	3	Rp122.048.239,84	2	Rp122.087.703,55	Rp28.188,37
H	2	Rp8.886.513,15	1	Rp10.001.636,94	Rp796.516,99
I	3	Rp117.685.749,18	2	Rp117.725.212,89	Rp28.188,37
J	2	Rp27.620.534,40	1	Rp27.646.843,54	Rp18.792,24
K	2	Rp2.592.396,18	1	Rp3.539.858,75	Rp676.758,98
L	2	Rp179.265.406,90	1	Rp188.101.029,47	Rp6.311.158,98
M	2	Rp38.051.357,77	1	Rp38.077.666,91	Rp18.792,24
N	2	Rp4.443.256,58	1	Rp5.558.380,37	Rp796.516,99
O	1	Rp45.101.988,47	1	Rp49.218.729,99	Rp2.940.529,66
P	1	Rp1.209.784,88	1	Rp1.683.516,17	Rp338.379,49
Q	2	Rp64.983.710,00	1	Rp73.819.332,57	Rp6.311.158,98
R	1	Rp32.579.706,50	1	Rp36.696.448,02	Rp2.940.529,66
S	1	Rp4.278.629,52	1	Rp4.313.369,81	Rp24.814,50

Biaya Langsung

Biaya langsung merupakan biaya yang dikeluarkan secara langsung dan terlibat dengan proses jalannya pelaksanaan konstruksi dilapangan. Total biaya langsung yang didapat pada proyek ini telah dihitung seperti hitungan diatas dengan total biaya sebesar Rp2.539.919.600,37.

Biaya Tak Langsung

Biaya ini disebut biaya tidak langsung karena tidak berhubungan secara langsung dengan pelaksanaan proyek di lapangan tetapi biaya tidak langsung ini harus tetap ada karena dibutuhkan. Biaya tidak langsung bergantung pada lamanya durasi proyek. Jika durasi proyek yang dihasilkan lebih lama maka biaya tidak langsung akan meningkat, sebaliknya jika durasi proyek yang dihasilkan lebih cepat maka biaya tidak langsung akan berkurang. Berdasarkan wawancara yang dilakukan dengan konsultan proyek, biaya tidak langsung Pembangunan proyek ini sebesar 2% dari total biaya normal ditambah dengan PPN sebesar 11%.

Metode Time Cost Trade Off

Metode ini dilakukan setelah mendapatkan hasil dari *cost slope* dari setiap pekerjaan yang berada di kegiatan kritis. Selanjutnya melakukan analisis Metode *Time Cost Trade Off* yang merupakan suatu metode pertukaran waktu dan biaya. Analisis ini dilakukan dengan cara melakukan kompresi (penekanan) pada aktivitas yang berada pada lintasan kritis. Kompresi (penekanan) durasi proyek dimulai dari aktivitas yang mempunyai *cost slope* terendah. Dari tahap-tahap pengkompresian tersebut akan dicari waktu terpendek dari biaya total yang paling minimal. Tahapan ini dilakukan dengan menggunakan analisa *genetic algoritma* berbasis python dengan menggunakan persamaan *fitness function* sebagai berikut:

$$Fc = \sum Total\ percepatan - \sum Direct + \sum Indirect \quad (4.8)$$

Dengan parameter GA yang digunakan adalah sebagai berikut: probabilitas cross over sebesar 0,7 dan probabilitas mutation sebesar 0,1, mengacu pada studi pengaruh nilai probabilitas crossover terhadap kinerja algoritma genetika dalam optimasi penjadwalan (Salman, R.A., 2023).

```

Fix TCTO & GA.ipynb • # Gunakan fungsi critical_path pada dataframe yang diberikan
+ Code + Markdown | ▶ Run All | ⌂ Clear All Outputs | 📄 Variables | 📖 Outline | Python 3.12.3

durasi_akhir = durasi_awal
biaya_akhir = biaya_awal
cost_slope = 0

list_cost_slope.append(cost_slope)
duration_per_activity.append(round(durasi_akhir))
cost_per_activity.append(round(biaya_akhir))

list_percepatan = df['Durasi Awal'] - duration_per_activity

df_optimized = pd.DataFrame({
    'Simbol': df['Simbol'],
    'Uraian Kegiatan': df['Uraian Kegiatan'],
    'Durasi Awal': df['Durasi Awal'],
    'Durasi Akhir': duration_per_activity,
    'Percepatan': list_percepatan,
    'Cost Slope': list_cost_slope,
    'Direct Cost': cost_per_activity,
    'Kegiatan pendahulu': df['Kegiatan pendahulu']
})

# Calculate the critical path for the optimized schedule
df_optimized, critical_path_symbols, total_durasi = critical_path_optimized(df_optimized)
total_direct_cost = sum(cost_per_activity)
# total_indirect_cost = (sum(df['Biaya Awal']) * 0.02) + 2280535084
total_indirect_cost = (sum(df['Biaya Awal']) * 0.02) + (sum(df['Biaya Awal']) * 0.11)
indirect_cost = (total_indirect_cost/60) * total_durasi
optimum_cost = total_direct_cost + indirect_cost

fitness_value = (1.0 * total_percepatan - 1.0 * total_direct_cost + 1.0 * total_indirect_cost)

if return_details:
    return df_optimized, critical_path_symbols, total_durasi, total_direct_cost, indirect_cost, optimum_cost, total_percepatan, total_cost_slope, fitness_value
else:
    return total_percepatan, total_direct_cost, indirect_cost

```

Gambar 4. Persamaan fitness dalam program
Sumber: Dokumentasi pribadi

```

Fix TCTO & GA.ipynb • # Gunakan fungsi critical_path pada dataframe yang diberikan
+ Code + Markdown | ▶ Run All | ⌂ Clear All Outputs | 📄 Variables | 📖 Outline | Python 3.12.3

def main():
    len_df = len(df)
    pop = toolbox.population(n=len_df) # Membuat populasi awal sebanyak 20 individu
    hof = tools.HallOfFame(1) # Menyimpan individu terbaik
    stats = tools.Statistics(lambda ind: ind.fitness.values) # Statistik berdasarkan fitness

    fitness_weights = [1.0, -1.0, -1.0]

    stats.register("Rata-Rata Percepatan", lambda x: sum(val[0] for val in x) / len(x))
    stats.register("Rata-Rata Direct Cost", lambda x: sum(val[1] for val in x) / len(x))
    stats.register("Rata-Rata Indirect Cost", lambda x: sum(val[2] for val in x) / len(x))

    best_individuals_per_gen = []
    all_individuals = []

    # params for GA
    mu = 2 * len_df
    ld = mu * 2
    crossOver = 0.7
    mut_prob = 0.1
    ngen = len_df
    iter = len_df

    # Algoritma genetika dijalankan selama 100 generasi
    for iteration in range(int(iter)):
        # with suppress_stdout():
        algorithms.eaMPLambda(pop, toolbox, mu=int(mu), lambda_=int(ld), cxpb=crossOver, mutpb=mut_prob, ngen=int(ngen), stats=stats, hof=hof)
        best_individuals_per_gen.append(hof[0].copy()) # Simpan individu terbaik di setiap generasi
        # save all individuals
        all_individuals.append(ind.copy() for ind in pop)

    return pop, stats, best_individuals_per_gen, all_individuals

```

Gambar 5. Parameter dalam program
Sumber: Dokumentasi pribadi

Proses kompresi ini dilakukan sampai durasi dan biaya yang didapatkan sudah maksimal dan sudah jenuh sehingga tidak dapat dilakukan *crashing* lagi namun perlu dilihat bahwa saat melakukan kompresi pengurangan hari tidak boleh sampai merusak jalur kritis yang ada. Hasil pengkompresian (penekanan) terhadap waktu dan biaya dengan GA dapat dilihat pada Tabel 4.6 dengan penambahan jam lembur 4 jam.

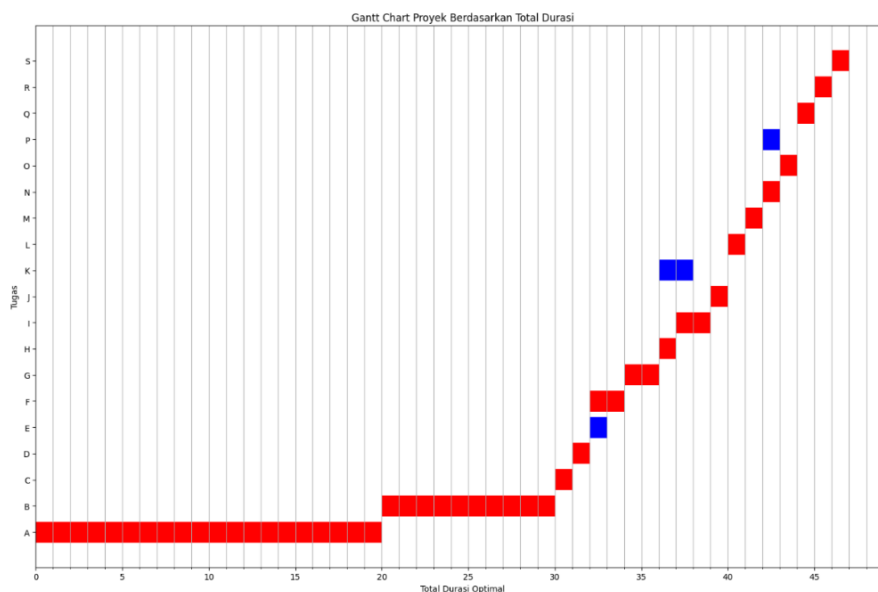
Tabel 7. Hasil perhitungan total cost

Durasi	Direct	Indirect	Total
47	Rp2.872.595.092,00	Rp224.911.721,10	Rp3.097.506.813,10
48	Rp2.835.484.010,00	Rp229.697.076,87	Rp3.065.181.086,87
49	Rp2.798.372.927,00	Rp234.482.432,64	Rp3.032.855.359,64
50	Rp2.761.261.845,00	Rp239.267.788,41	Rp3.000.529.633,41
51	Rp2.752.426.222,00	Rp244.053.144,17	Rp2.996.479.366,17
52	Rp2.687.039.680,00	Rp248.838.499,94	Rp2.935.878.179,94
53	Rp2.649.928.598,00	Rp253.623.855,71	Rp2.903.552.453,71
54	Rp2.612.817.515,00	Rp258.409.211,48	Rp2.871.226.726,48
55	Rp2.575.706.433,00	Rp263.194.567,25	Rp2.838.901.000,25
56	Rp2.566.870.810,00	Rp267.979.923,01	Rp2.834.850.733,01
57	Rp2.558.035.188,00	Rp272.765.278,78	Rp2.830.800.466,78
58	Rp2.550.792.333,00	Rp277.550.634,55	Rp2.828.342.967,55

Tabel 7. Hasil perhitungan total cost (Lanjutan)

Durasi	Direct	Indirect	Total
59	Rp2.549.677.209,00	Rp282.335.990,32	Rp2.832.013.199,32
60	Rp2.548.562.086,00	Rp287.121.346,09	Rp2.835.683.432,09
61	Rp2.545.202.414,00	Rp291.906.701,86	Rp2.837.109.115,86
62	Rp2.543.339.107,00	Rp296.692.057,62	Rp2.840.031.164,62
63	Rp2.542.281.394,00	Rp301.477.413,39	Rp2.843.758.807,39
64	Rp2.541.108.860,00	Rp306.262.769,16	Rp2.847.371.629,16
65	Rp2.541.126.806,00	Rp311.048.124,93	Rp2.852.174.930,93
66	Rp2.540.011.683,00	Rp315.833.480,70	Rp2.855.845.163,70
67	Rp2.539.985.373,00	Rp320.618.836,46	Rp2.860.604.209,46
68	Rp2.539.959.064,00	Rp325.404.192,23	Rp2.865.363.256,23
69	Rp2.539.919.600,00	Rp330.189.548,00	Rp2.870.109.148,00

Dari tabel diatas didapat bahwa total percepatan maksimal yang bisa dilakukan adalah yang semula 69 hari menjadi 47 hari dengan biaya awal saat 69 hari adalah Rp2.870.109.148,00 dan saat di percepatan menjadi 47 hari total biaya menjadi Rp3.097.506.813,10. Berikut gambar ganchart dan tabel percepatan maksimal 47 hari:



Gambar 6. Ganchart durasi maksimal 47 hari
Sumber: Dokumentasi pribadi

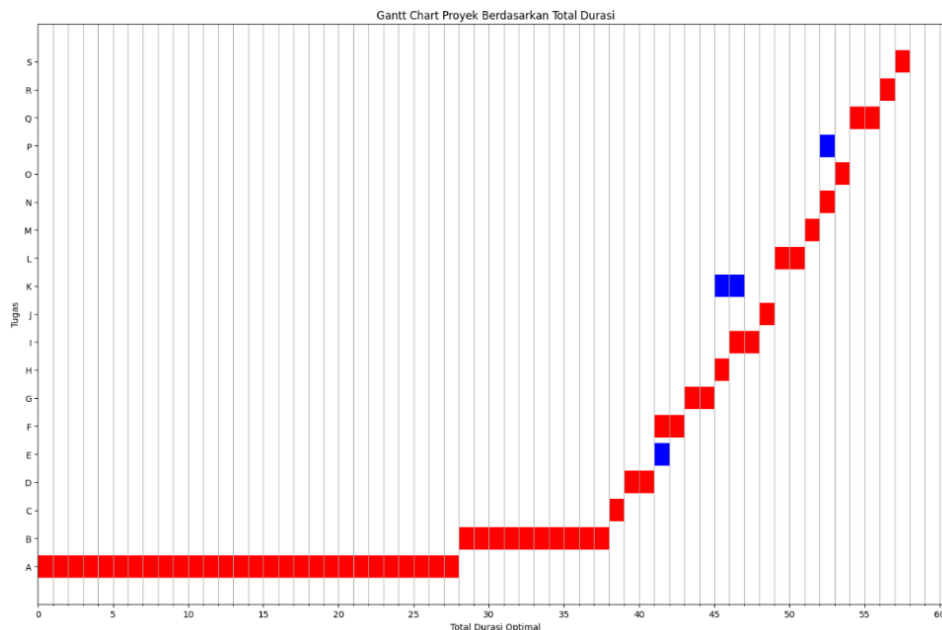
Dari ganchart diatas dapat dilihat bahwa pekerjaan yang memiliki warna merah merupakan pekerjaan yang berada pada jalur kritis Dimana rincian detail akan ditampilkan pada tabel 8 dibawah ini:

Tabel 8. Rincian detail percepatan maksimal

CODE	Item	Da	Dc	Lembur
A	Pekerjaan Borpile	28	20	8 hari
B	Pekerjaan Galian Struktur	14	10	4 hari
C	Pekerjaan Urukan Pasir	2	1	1 hari
D	Pekerjaan Cor Lantai Kerja	2	1	1 hari
E	Pengujian Csl	1	1	0 hari
F	Pengujian Pdlt	2	2	0 hari
G	Pembesian Footing Abutment	3	2	1 hari
H	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	2	1	1 hari
I	Pembesian Badan Abutment	3	2	1 hari
J	Pembesian Wingwall Abutment	2	1	1 hari
K	Pemasangan Thermocouple Footing	2	2	0 hari
L	Pengecoran Footing Mass Concreat Fe' 35 Mpa	2	1	1 hari
M	Pembesian Kepala Abutment	2	1	1 hari
N	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	2	1	1 hari
O	Pengecoran Badan Abutment Fe' 35 Mpa	1	1	0 hari
P	Pemasangan Thermocouple Kepala Abutment	1	1	0 hari
Q	Pengecoran Kepala Abutment Mass Concreat Fe' 35 Mpa	2	1	1 hari
R	Pengecoran Wingwall Abutment Fe'35 Mpa	1	1	0 hari
S	Pembukaan Bekisting Abutment	1	1	0 hari

Dari pengamatan diatas dapat dilihat bahwa nilai cost yang didapat dengan total percepatan yang maksimal memiliki dampak terhadap kenaikan biaya yang cukup signifikan yakni sebesar Rp227.397.664,68 atau 7,9 %. Hal ini tidak bisa dijadikan rekomendasi, maka dari itu perlu analisa dengan melihat nilai total biaya terkecil agar mendapat titik durasi optimum dengan biaya yang rendah. Dari tabel 4.6 dapat kita lihat bahwa nilai total cost terendah didapat pada percepatan dengan durasi 58 hari dimana total cost sebesar Rp2.828.342.967,55.

Total biaya pada durasi 58 hari ini mengalami penurunan dari total biaya pada durasi 69 hari (normal) dimana sebelumnya Rp2.870.109.148,00 menjadi Rp2.828.342.967,55. Total penurunan biaya yang terjadi adalah sebesar Rp41.766.180,87 atau 1,45 % dari biaya 69 hari dengan total percepatan yang dilakukan adalah 11 hari. Dibawah ini akan ditampilkan: ganchart dan tabel detail percepatan optimum:



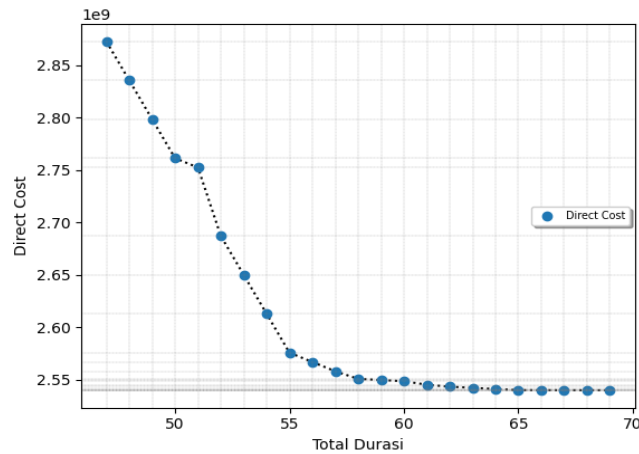
Gambar 7. Ganchart durasi optimal 58 hari
Sumber: Dokumentasi pribadi

Dari ganchart diatas dapat dilihat bahwa pekerjaan yang memiliki warna merah merupakan pekerjaan yang berada pada jalur kritis Dimana rincian detail akan ditampilkan pada tabel 9 dibawah ini:

Tabel 9. Rincian detail percepatan optimal

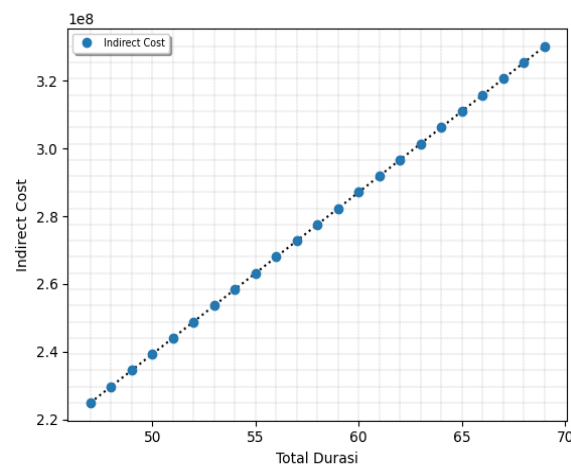
CODE	Item	Da	Dc	Lembur
A	Pekerjaan Borpile	28	28	0 hari
B	Pekerjaan Galian Struktur	14	10	4 hari
C	Pekerjaan Urukan Pasir	2	1	1 hari
D	Pekerjaan Cor Lantai Kerja	2	2	0 hari
E	Pengujian Csl	1	1	0 hari
F	Pengujian Pdlt	2	2	0 hari
G	Pembesian Footing Abutment	3	2	1 hari
H	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	2	1	1 hari
I	Pembesian Badan Abutment	3	2	1 hari
J	Pembesian Wingwall Abutment	2	1	1 hari
K	Pemasangan Thermocouple Footing	2	2	0 hari
L	Pengecoran Footing Mass Concreat Fc' 35 Mpa	2	2	0 hari
M	Pembesian Kepala Abutment	2	1	1 hari
N	Pemasangan Pipa Pvc 100 mm	2	1	1 hari
O	Pengecoran Badan Abutment Fc' 35 Mpa	1	1	0 hari
P	Pemasangan Thermocouple Kepala Abutment	1	1	0 hari
Q	Pengecoran Kepala Abutment Mass Concreat Fc' 35 Mpa	2	2	0 hari
R	Pengecoran Wingwall Abutment Fc'35 Mpa	1	1	0 hari
S	Pembukaan Bekisting Abutment	1	1	0 hari

Gambaran detail percepatan optimal yang didapat akan di tampilkan dalam bentuk grafik dibawah ini:



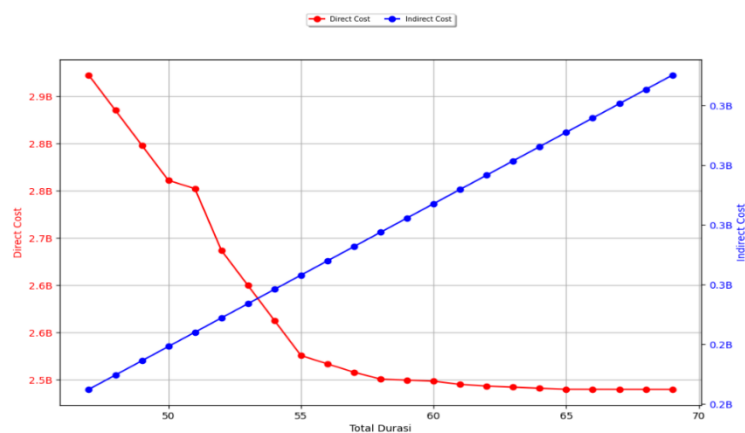
Gambar 8. Grafik Hubungan direct cost dengan durasi
Sumber: Dokumentasi pribadi

Grafik diatas menunjukkan biaya langsung (*direct cost*) yang memiliki pola semakin membesar seiring dengan bertambahnya percepatan drurasi Dimana hal ini menunjukan bahwa hasil analisa sudah sesuai dengan teori atau ketentuan yang berlaku.



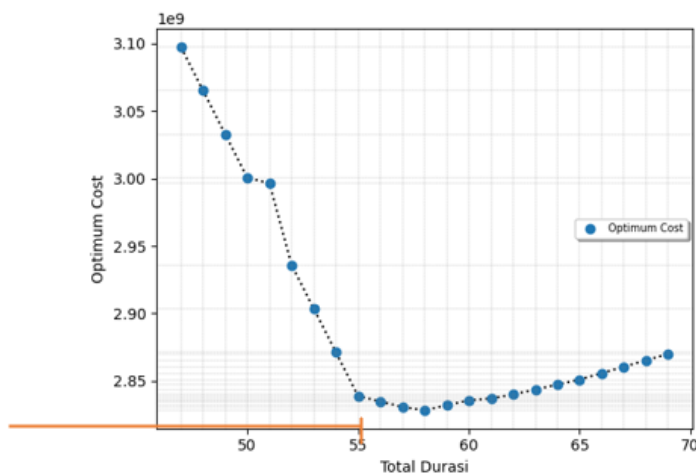
Gambar 9. Grafik Hubungan indirect cost dengan durasi
Sumber: Dokumentasi pribadi

Grafik diatas menunjukkan biaya tak langsung (*indirect cost*) yang memiliki pola semakin mengecil seiring dengan bertambahnya percepatan drurasi Dimana hal ini menunjukan bahwa hasil analisa sudah sesuai dengan teori atau ketentuan yang berlaku.



Gambar 10. Grafik Hubungan Direct & indirect cost dengan durasi
Sumber: Dokumentasi pribadi)

Grafik diatas menunjukkan hubungan biaya langsung & biaya tak langsung (*indirect cost*) yang memiliki pola masing – masing berbeda dimana biaya direct semakin bertambah jika durasi semakin cepat dan biaya *indirect* semakin kecil jika durasi semakin cepat.



Gambar 11. Grafik Durasi Optimum
Sumber: Dokumentasi pribadi

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa dari durasi normal yaitu 69 hari nilai cost mengalami penurunan sampai pada durasi 58 hari (*cost* terkecil) kemudian mengalami kenaikan yang signifikan sampai durasi ke 47 hari, hal ini berarti pada durasi 58 hari adalah durasi optimum dengan cost terkecil yaitu sebesar Rp2.828.342.967,55.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa diatas, pertama diperoleh hasil perhitungan percepatan pekerjaan abutmen, durasi normal selama 69 hari dapat dipercepat menjadi dua jenis percepatan: percepatan maksimal selama 47 hari dan percepatan optimal selama 58 hari. Kedua, pada kondisi percepatan maksimal (47 hari), terjadi kenaikan biaya yang signifikan atau meningkat sebesar 7,9% dari biaya normal. Pekerjaan yang dilakukan secara lembur pada kondisi ini meliputi pekerjaan dengan kode: A, B, C, D, G, H, I, J, L, M, N, dan Q. Ketiga, pada kondisi percepatan optimal (58 hari), justru terjadi penurunan biaya sebesar 1,45% dari biaya normal. Pekerjaan lembur dalam kondisi ini mencakup kode: B, C, G, H, I, M, dan N. Keempat, dari analisis grafik direct cost dan indirect cost, dapat disimpulkan bahwa direct cost akan meningkat seiring percepatan durasi, sedangkan indirect cost justru menurun jika durasi dipercepat. Hal ini membuktikan bahwa untuk mengoptimalkan pelaksanaan proyek, diperlukan keseimbangan antara biaya langsung dan biaya tidak langsung.

Selain itu, *Genetic Algorithm* (GA) terbukti sebagai metode yang praktis dan aplikatif dalam menyelesaikan permasalahan *Time Cost Trade Off* pada proyek konstruksi. GA dapat digunakan untuk mengoptimalkan kombinasi antara durasi dan biaya proyek dengan cara mengevaluasi berbagai alternatif percepatan aktivitas kerja. Dalam prosesnya, GA membentuk populasi solusi berdasarkan kombinasi aktivitas yang dipercepat, kemudian melakukan seleksi terhadap solusi terbaik berdasarkan total biaya proyek. Proses *crossover* dan mutasi selanjutnya menghasilkan solusi baru yang lebih efisien. Pendekatan ini sangat cocok digunakan pada proyek dengan banyak aktivitas dan keterkaitan antar pekerjaan yang kompleks, karena GA tidak memerlukan rumus turunan matematis dan mampu mengakomodasi batasan-batasan proyek. Dengan demikian, kemampuannya dalam menangani banyak variabel dan menyesuaikan dengan berbagai kondisi proyek menjadikan GA sangat aplikatif sebagai alat bantu perencanaan dan pengambilan keputusan di bidang manajemen proyek konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., & Naeem, S. (2022). The Controller Parameter Optimization For Nonlinear Systems Using Particle Swarm Optimization And Genetic Algorithm. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 12(1).
- Ammar, M. A. (2020). Efficient Modeling Of Time-Cost Trade-Off Problem By Eliminating Redundant Paths. *International Journal of Construction Management*, 20(7), 812-821.
- Aristyono, D., Hakim, A., & Della Oganda, D. (2024). Optimasi Penjadwalan Proyek Dengan Kombinasi Critical Path Method dan Algoritma Genetika (Studi Kasus: Pt. Hervindo Inti Nusantara). *Industrial Engineering Student Scientific Journal*, 2(2), 94-102.
- Assyura, D. M., & Khoiri, M. (2023). Estimasi Biaya dan Waktu Pekerjaan Underpass pada Jalan Tol Serpong-Balaraja Menggunakan Metode Erection dengan Transfer Beam. *Jurnal Teknik ITS*, 12(1), D64-D69.

- Bourne, L. M., & Weaver, P. (2018). The Origins of Schedule Management: The Concepts Used in Planning, Allocating, Visualizing And Managing Time In A Project. *Frontiers of Engineering Management*, 5(2), 150-166.
- Dirgiantara, D. R., & Sutantiningrum, K. H. (2024, December). Optimalisasi Penjadwalan Proyek Lapangan Olahraga: Faktor Keterlambatan dan Pengembangan Strategi. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil* (Vol. 6, No. 1, pp. 217-227).
- Fauzananda, F. A. (2025). Optimasi Biaya dan Waktu dengan Meode Time Cost Trade Offpada Proyek Rumah Sakit Kanker Dharmais (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- JUNIAWAN, I. (2024). Analisis Percepatan Waktu Pelaksanaan Proyek Dengan Metode Tcto (Time Cost Trade Off (Studi Kasus: Pembangunan Gedung 2A RSUD Bangli) (Doctoral dissertation, Universitas Mahasaraswati Denpasar).
- Krisnandi, K., & Agung, H. (2017). Implementasi Algoritma Genetika Untuk Memprediksi Waktu dan Biaya Pengerjaan Proyek Konstruksi. *Jurnal Ilmiah FIFO*, 9(2), 90-97.
- Kurniawan, W. (2015). Analisa Metode Time Cost Trade Off Pada Pelaksanaan Proyek Pembangunan Gedung The Samator Surabaya.
- Messah, Y. A., Berelaku, D. C. S., Ramang, R., Project, M., Kritis, L., Slope, C., Trade-, T. C., & Cost, C. (2023). Perbandingan Penambahan Waktu Kerja Dan Penambahan Tenaga Kerja Terhadap Biaya Pelaksanaan Proyek. 12(2).
- Muzdalifah, L., Kurniawati, E. F., Ulul, E. D., & Pamitra, K. G. (2019). Penjadwalan Proyek Perumahan Dengan Optimasi Waktu dan Biaya Harian. *Jurnal Riset dan Aplikasi Matematika (JRAM)*, 3(2), 78-88.
- Nurazizah, N., Firdasari, F., & Purwandito, M. (2023). Penerapan Metode Time-Cost Trade-Off dalam Optimalisasi Biaya dan Jadwal Proyek Laboratorium Dasar Universitas Samudra. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi*, 6(1), 94-103.
- Priyo, M., & Aulia, M. R. (2016). Aplikasi Metode Time Cost Trade Off Pada Proyek Konstruksi: Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung Indonesia. *Semesta Teknik*, 18(1), 30–43. <https://doi.org/10.18196/st.v18i1.703>
- Salman, O., Melissourgou, T., & Kampouridis, M. (2023, July). Optimization of trading strategies using a genetic algorithm under the directional changes paradigm with multiple thresholds. In *2023 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1-8). IEEE.
- Salman, R. A. (2023). Analisis Pengaruh Probabilitas Crossover Terhadap Kinerja Algoritma Genetika Dalam Optimalisasi Penjadwalan Matakuliah. *Jurnal Teknoif: Teknik Informatika Institut Teknologi Padang*, 11(2), 69–74.
- Saputro, W. A. (2025). Analisis Biaya dan Durasi Pekerjaan dengan Metode Crashing (Studi Kasus Proyek Rehabilitasi SDN 2 Sedadi Grobogan) (Doctoral dissertation, Universitas Islam Sultan Agung Semarang).
- Septianus, A., Laorent, D., & Nugraha, P. (2014). Penggunaan Linear Programming Dan Genetic Algorithms Dalam Menyelesaikan Time-cost Trade-off Problem. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3(1).
- Simamora, R. (2024). Penaksiran Parameter Regresi Nonlinear Menggunakan Particle Swarm Optimization dan Genetic Algorithm. *Leibniz: Jurnal Matematika*, 4(2), 71-83.
- Sofia, D. A., & Putri, A. A. E. (2021, September). Analisis Perbandingan Penambahan Jam Kerja dan Tenaga Kerja terhadap Waktu dan Biaya Proyek dengan Metode Time Cost Trade Off. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 12, pp. 846-854).
- Sumadireja, I., Prianto, C., & Saputra, M. H. K. (2020). Optimasi nilai pendapatan menggunakan algoritma genetika (Vol. 1). Kreatif.
- Syahada, K. N., Rindo, G., Santosa, A. W. B., & Prasetyo, N. A. (2024). Analisis Reschedule Keterlambatan Proyek Reparasi Dua Kapal dengan Metode Critical Path Method (CPM) dan Time Cost Trade Off (TCTO) pada KM. Kendhaga Nusantara 4 dan TB. Sorowako Star. *Jurnal Integrasi*, 16(2), 156-164.
- Utari, R. P., Hadad, M. N., & Wahyudiono, S. (2022). Analisis Percepatan Proyek dengan Metode Time Cost Trade Off (Studi Kasus Pada Gedung Student Center UIN Datokrama Palu). *Media Teknik Sipil*, 20(1), 7-13.
- Wang, T., Abdallah, M., Clevenger, C., & Monghasemi, S. (2021). Time–Cost–Quality Trade-Off Analysis for Planning Construction Projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(1), 82-100.
- Yuwono, A. J., & Setiawan, B. (2023). Analisis Faktor Keterlambatan Proyek Konstruksi Manara 17 PWNJ Jatim. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 604-609).
- Zahir, L. A. (2021). Strategi Optimasi Waktu Dan Biaya Menggunakan Time Cost Trade Off (Tcto) Pada Pembangunan Gedung Ruang Kelas Smpn 1 Besuki. *JURNAL DAKTILITAS*, 1(2), 36-51.