



**ANALISIS OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PROYEK
KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE *TIME COST*
TRADE OFF INTEGRASI DENGAN *PYTHON***

TUGAS AKHIR

Oleh :

Al Rafi Afzaal Fazl Rab

NIM. 221910301007

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS JEMBER

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL

JEMBER

2026



**ANALISIS OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PROYEK
KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE *TIME COST*
TRADE OFF INTEGRASI DENGAN *PYTHON***

*Diajukan untuk memenuhi Sebagian persyaratan memperoleh gelar sarjana pada
program studi Strata 1 Teknik Sipil*

TUGAS AKHIR

Oleh :

Al Rafi Afzaal Fazl Rab

NIM. 221910301007

KEMENTRIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS JEMBER

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK SIPIL

JEMBER

2026

PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua saya, Bapak Solikin dan Ibu Indah Susilowati, yang selalu mendukung setiap langkah yang salah pilih tanpa memaksakan kehendak pribadi. Mereka senantiasa memberikan dukungan, baik secara moral maupun materil dengan penuh keikhlasan, sehingga saya selalu merasa tercukupi.
2. Ketiga adik perempuan saya, Aqeela Mutia Zahra, Shafiqah Khansa Ghania, dan Saabirah Khashia Azmi, yang selalu menjadi motivasi untuk saya dapat menjadi manusia juga kakak yang bisa menjadi contoh baik kedepannya.
3. Kakek dan nenek saya, Ibu Misnatun, Almarhum Bapak Paeran, Almarhum Bapak Samidi, dan Almarhum Ibu Aminah, yang selalu mengharapakan cucunya untuk bisa mendapat pendidikan yang tinggi.
4. DPA dan DPU, Bapak Udin dan Ibu Anik yang selalu memberikan saya dukungan, motivasi, didikan, dan bimbingan dengan sabar dalam proses perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir.
5. Dosen, guru, dan pihak-pihak lain yang telah mendidik dan memberikan ilmu serta wawasan yang tak terhingga selama menempuh pendidikan.
6. Fianti Zoya Rachmania, yang selalu mendukung saya dalam menjalani proses perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir, serta memberikan saya dorongan dan motivasi untuk saya dapat tetap berkembang menjadi lebih baik.
7. Teman-teman kuliah saya, yang sudah banyak membantu dan menemani proses kuliah 4 tahun ini.
8. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Eu farei 10x se for preciso. Eles não estão preparados.”

“I’ll do it 10x if I have to. They’re not ready.”

- Vinícius José Paixão de Oliveira Júnior



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Al Rafi Afzaal Fazl Rab

NIM : 221910301007

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “ANALISIS OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE *TIME COST TRADE OFF* INTEGRASI DENGAN *PYTHON*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun, serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 16 Juli 2026

Yang menyatakan,



Al Rafi Afzaal Fazl Rab

NIM. 221910301007

HALAMAN PERSETUJUAN

Tugas akhir berjudul “ANALISIS OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE *TIME COST TRADE OFF* INTEGRASI DENGAN *PYTHON*” telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 16 Juli, 2026

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Ir. Anik Ratnaningsih, S.T., M.T.

NIP : 197005301998032001

Tanda Tangan

(.....)

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Prof. Dr. Ir. Jojok W. Soetjipto, S.T., M.T.

NIP : 197205272000031001

2. Penguji Anggota

Nama : Ir. Anita Trisiana, S.T., M.T.

NIP : 198009232015042001

(.....)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT. Atas segala Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ANALISIS OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE *TIME COST TRADE OFF* INTEGRASI DENGAN *PYTHON*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan Skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Anik Ratnaningsih, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam proses penulisan skripsi ini.
2. Akhmad Hasanuddin, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi Mahasiswa.
3. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Sebagai penutup, penulis juga berharap skripsi ini dapat bermanfaat kedepannya.

Jember, 16 Juli 2026

Yang menyatakan,



Al Rafi Afzaal Fazl Rab

NIM. 221910301007

ABSTRAK

Keterlambatan waktu dan pembengkakan biaya merupakan permasalahan yang sering terjadi pada proyek konstruksi dan berdampak pada kinerja proyek secara keseluruhan. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah optimasi waktu dan biaya. Penelitian ini dilakukan pada pembangunan Jembatan No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, Kabupaten Subang, Jawa Barat, yang mengalami keterlambatan sekitar 2% akibat kondisi alam dan lingkungan sekitar. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan aktivitas pada jalur kritis serta mengetahui durasi dan biaya paling optimal setelah dilakukan percepatan. Data yang digunakan berupa penjadwalan proyek, RAB, volume pekerjaan, koefisien tenaga kerja, dan harga satuan pekerja yang ada pada proyek. Penentuan jalur kritis dilakukan menggunakan *Critical Path Method* (CPM) yang diintegrasikan dengan bahasa pemrograman *Python* dan divalidasi menggunakan *Microsoft Project*, serta untuk mengotomatisasi perhitungan jaringan kerja, identifikasi jalur kritis, dan analisis cost slope secara efisien. Alternatif percepatan yang diterapkan meliputi penambahan lembur 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, serta penerapan shift kerja. Alternatif-alternatif ini dipilih karena memanfaatkan tenaga kerja yang sudah memahami proyek sehingga tidak diperlukan orientasi tambahan. Hasil analisis menunjukkan terdapat 12 aktivitas yang termasuk dalam jalur kritis. Dari keempat alternatif yang dianalisis, penerapan *shift* kerja pada iterasi ke-10 menghasilkan durasi dan biaya total paling optimal, yaitu 307,10 hari dengan total biaya Rp 87,566,528,176.75, lebih cepat dibandingkan kondisi normal dengan durasi 341 hari dan biaya Rp 88,386,871,932.42. Penurunan biaya total ini disebabkan oleh berkurangnya biaya tidak langsung akibat pengurangan durasi proyek, meskipun biaya langsung mengalami peningkatan. Dengan penggunaan *Python*, pengolahan banyak data dapat dilakukan dengan lebih efisien dan juga fleksibel.

Kata kunci: *Time Cost Trade Off*, jalur kritis, *Critical Path Method*, optimasi biaya dan waktu, *Python*, proyek konstruksi

ABSTRACT

Time delays and cost overruns are common problems in construction projects that affect overall project performance. One solution that can be applied is time and cost optimization. This research was conducted on the construction of Bridge No. 8 of the Patimban Access Toll Road Development Project Package 1, Subang Regency, West Java, which experienced a delay of approximately 2% due to natural and environmental conditions. This research aims to determine the activities on the critical path as well as to identify the most optimal duration and cost after acceleration is applied. The data used include project scheduling, Bill of Quantities (BOQ), work volume, labor coefficients, and unit prices of labor available on the project. Critical path determination was carried out using the Critical Path Method (CPM) integrated with the *Python* programming language and validated using Microsoft Project, in order to automate the calculation of the work network, critical path identification, and cost slope analysis efficiently. The acceleration alternatives applied consist of the addition of 1-hour, 2-hour, 3-hour, and 4-hour overtime, as well as the implementation of shift work. These alternatives were selected because they utilize the existing workforce, who are already familiar with the project, thereby eliminating the need for additional orientation. The analysis results show that there are 12 activities included in the critical path. Of the five alternatives analyzed, the implementation of shift work at the 10th iteration produced the most optimal total duration and cost, namely 307.10 days with a total cost of IDR 87,566,528,176.75, faster than the normal condition duration of 341 days and cost of IDR 88,386,871,932.42. This reduction in total cost is caused by the decrease in indirect costs resulting from the shortened project duration, despite an increase in direct costs. With the use of *Python*, the processing of large amounts of data can be carried out more efficiently and flexibly.

Keywords: *Time Cost Trade Off*, critical path, *Critical Path Method*, time-cost optimization, *Python*, construction project

RINGKASAN

Proyek konstruksi seringkali menghadapi permasalahan keterlambatan waktu dan pembengkakan biaya yang saling berkaitan. Penelitian ini menerapkan metode Time Cost Trade Off (TCTO) yang diintegrasikan dengan *Python* pada pembangunan Jembatan No. 8, Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, Kabupaten Subang, Jawa Barat, yang mengalami keterlambatan sekitar 2% dengan total biaya struktur sebesar Rp 88.386.871.932,42. Data sekunder berupa penjadwalan, RAB, dan harga satuan digunakan untuk menentukan jalur kritis melalui *Critical Path Method* (CPM) yang divalidasi dengan *Microsoft Project*, kemudian dianalisis dengan lima alternatif percepatan: penambahan jam lembur 1, 2, 3, dan 4 jam, serta penerapan sistem *shift* kerja.

Dari 24 aktivitas pada Jembatan No. 8, ditemukan 12 aktivitas jalur kritis dengan total durasi normal 97 hari. Perhitungan crash duration menunjukkan durasi dapat direduksi menjadi 87,19 hari (lembur 1 jam), 80,83 hari (lembur 2 jam), 76,83 hari (lembur 3 jam), 74,62 hari (lembur 4 jam), dan 51,32 hari (*shift* kerja). Biaya tidak langsung ditetapkan sebesar 13% dari total biaya proyek mengacu pada PERMEN-PUPR No. 8 Tahun 2023, menghasilkan biaya langsung Rp 78.218.470.736,65 dan biaya tidak langsung Rp 10.168.401.195,77 pada kondisi normal, di mana biaya langsung meningkat seiring percepatan sementara biaya tidak langsung menurun seiring berkurangnya durasi proyek.

Pada alternatif lembur, skenario lembur 3 jam menghasilkan durasi dan biaya total paling optimal, yaitu 320,83 hari dengan total biaya Rp 88.119.661.076,48, sedangkan pada alternatif *shift* kerja yang dilakukan secara iteratif berdasarkan *cost slope*, iterasi ke-10 menghasilkan durasi dan biaya total paling optimal, yaitu 307,10 hari dengan total biaya Rp 87.566.528.176,75. Dari kedua alternatif tersebut, *shift* kerja pada iterasi ke-10 menjadi alternatif percepatan paling optimal secara keseluruhan, lebih rendah dibandingkan kondisi normal (341 hari, Rp 88.386.871.932,42), didorong oleh penurunan biaya tidak langsung yang signifikan meski biaya langsung meningkat. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan integrasi *Python* pada seluruh tahapan perhitungan TCTO di

penelitian selanjutnya, termasuk perhitungan *crash cost* dan *crash duration*, serta penambahan alternatif percepatan lain seperti penambahan tenaga kerja dan peralatan berat.



DAFTAR ISI

PERSEMBAHAN	iii
MOTTO.....	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Penelitian	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penjadwalan Proyek Konstruksi	7
2.2 Metode Penjadwalan Proyek Konstruksi	8
2.3 Biaya Proyek Konstruksi	8
2.4 <i>Critical Path Method</i>	9
2.5 <i>Time Cost Trade Off</i>	10
2.6 Produktivitas Pekerja	11
2.7 Penambahan Jam Lembur	12
2.8 Penambahan <i>Shift</i> Kerja	14
2.9 <i>Python</i>	15
2.10 <i>Cost Slope</i>	16

2.11	<i>Microsoft Project</i>	16
2.12	Penelitian Terdahulu.....	18
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....		21
3.1	Lokasi Penelitian.....	21
3.2	Pengumpulan Data	22
3.3	Tahapan Penelitian	22
3.4	Bagan Alir Penelitian	24
3.5	Matriks Penelitian	29
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1	Data Umum Pembangunan Proyek	31
4.2	Penyusunan Kembali Penjadwalan Proyek.....	32
4.3	Penentuan Jalur Kritis	33
4.3	Penentuan Kebutuhan Tenaga Kerja	36
4.4	Penerapan Metode <i>Time Cost Trade Off</i>	36
4.4.1	<i>Crash Duration</i> Jam Lembur	36
4.4.2	<i>Crash Duration</i> Shift Kerja.....	38
4.4.3	<i>Crash Cost</i> Jam Lembur	40
4.4.4	<i>Crash Cost</i> Shift Kerja	43
4.4.5	Perhitungan <i>Cost Slope</i>	45
4.5	Biaya Langsung dan Tidak Langsung.....	48
4.5.1	Perhitungan Biaya Tambahan.....	48
4.5.2	Rekapitulasi Biaya Langsung dan Tidak Langsung.....	49
4.6	Hubungan Biaya dan Waktu.....	50
4.7	Penentuan Durasi dan Biaya Optimum	54
BAB 5. KESIMPULAN.....		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN.....		62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	21
Gambar 3.2 Jembatan No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1	21
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 3.5 Diagram Alir <i>Python</i> Penentuan Jalur Kritis	26
Gambar 3.6 Diagram Alir <i>Python</i> Cost Slope	27
Gambar 3.7 Diagram Alir <i>Python</i> Grafik Hubungan Biaya dan Waktu	28
Gambar 4.1 Proses Penyusunan Kembali Penjadwalan Proyek	32
Gambar 4.2 Input Data dan Hasil Logika Perhitungan <i>Python</i>	34
Gambar 4.3 Validasi Microsoft Project	34
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Biaya Langsung dan Durasi Alternatif Lembur...50	
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Biaya Langsung dan Durasi Alternatif Shift Kerja	51
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Biaya Tidak Langsung dan Durasi Alternatif Lembur	52
Gambar 4.7 Grafik Hubungan Biaya Tidak Langsung dan Durasi Alternatif Shift Kerja.....	52
Gambar 4.8 Grafik Hubungan Waktu dan Biaya Skenario Lembur	55
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Waktu dan Biaya Skenario Lembur	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien Penurunan Produktivitas Jam Lembur	13
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	18
Tabel 3.1 Tabel Matriks Penelitian	29
Tabel 4. 1 Rencana Anggaran Biaya Pekerjaan Struktur Jembatan No. 08	31
Tabel 4.2 Pekerjaan Dalam Jalur Kritis	35
Tabel 4.3 Rekapitulasi Crash Duration Jam Lembur.....	37
Tabel 4.4 Rekapitulasi Crash Duration Shift Kerja	39
Tabel 4.5 Rekapitulasi Crash Cost Jam Lembur 1 Jam dan 2 Jam.....	41
Tabel 4.6 Rekapitulasi Crash Cost Jam Lembur 3 Jam dan 4 Jam.....	42
Tabel 4.7 Rekapitulasi Crash Cost Shift Kerja	44
Tabel 4.8 Rekapitulasi Perhitungan Cost Slope Lembur 1 Jam, 2 Jam dan 3 Jam.....	46
Tabel 4.9 Rekapitulasi Perhitungan Cost Slope 4 Jam dan Shift Kerja.....	47
Tabel 4.10 Rekapitulasi Biaya Tambahan	49
Tabel 4.11 Rekapitulasi Biaya Langsung dan Biaya Tidak Langsung Alternatif Lembur	49
Tabel 4.12 Rekapitulasi Biaya Langsung dan Biaya Tidak Langsung Alternatif Shift Kerja	49
Tabel 4.13 Rekapitulasi Biaya dan Durasi Lembur 1 Jam dan 2 Jam	53
Tabel 4.14 Rekapitulasi Biaya dan Durasi Lembur 3 Jam dan 4 Jam	53
Tabel 4.15 Rekapitulasi Biaya dan Durasi Shift Kerja.....	53

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada suatu pelaksanaan proyek konstruksi, terdapat banyak pekerjaan yang harus dikerjakan. Pada proses pengerjaan, tidak sedikit kendala yang harus dihadapi. Masalah yang umumnya dialami pada proyek konstruksi berhubungan dengan waktu penjadwalan dan juga biaya. Manajemen proyek merupakan sebuah hal yang harus diperhatikan dalam pelaksanaan proyek konstruksi. Manajemen proyek merupakan penerapan strategi yang bertujuan untuk mencapai efisiensi dan juga efektivitas dalam sebuah proyek konstruksi (Pratiwi et al., 2022). Menurut (Kerzner, 2009), manajemen proyek dilakukan dengan melalui beberapa tahapan, yaitu inisiasi proyek, perencanaan proyek, eksekusi proyek, monitoring proyek, dan finalisasi. Dalam menjalankan manajemen proyek, terdapat beberapa hal krusial yang harus diperhatikan, supaya tujuan proyek dapat tercapai, yaitu biaya, waktu, dan mutu, ketiga hal tersebut umumnya dikenal dengan *Triple Constraint* (Setiawan et al., 2021). Permasalahan keterlambatan waktu konstruksi proyek dan pembengkakan biaya dapat diakibatkan oleh proses manajemen proyek yang kurang optimal. Hal tersebut dapat berpengaruh terhadap kinerja proyek secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan manajemen proyek yang baik dan sesuai, untuk meminimalisir terjadinya hal-hal yang dapat menyebabkan kerugian dan hal-hal yang dapat membuat pelaksanaan proyek menjadi kurang optimal.

Keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya merupakan beberapa masalah yang sering muncul pada pelaksanaan proyek konstruksi. Keterlambatan proyek konstruksi dapat terjadi karena banyak faktor, seperti kompleksitas pekerjaan dan kondisi alam yang tidak dapat diprediksi. Waktu dan biaya merupakan dua variable yang saling berhubungan satu sama lain. Jika terjadi keterlambatan pada proyek konstruksi, maka biaya yang dibutuhkan juga akan semakin besar (Megawati & Lirawati, 2020). Keterlambatan dapat menimbulkan turunnya tingkat produktivitas pekerja, sehingga waktu

penyelesaian proyek akan menjadi tidak sesuai dengan kontrak awal. Selain itu, hal tersebut dapat membuat tingkat kredibilitas dari pihak yang bertanggung jawab pada pembangunan proyek tersebut (Sanaky et al., 2021). Melihat dampak yang dihasilkan oleh permasalahan keterlambatan proyek konstruksi, diperlukan solusi yang tepat untuk menghindari dan meminimalisir terjadinya masalah keterlambatan pada proyek konstruksi.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menghindari dan meminimalisir terjadinya masalah keterlambatan pada proyek konstruksi adalah, dengan melakukan optimasi waktu dan biaya pada proyek konstruksi. Optimasi dapat dilaksanakan dengan melakukan percepatan menggunakan metode TCTO (*Time Cost Trade Off*). Metode ini dapat dilakukan dengan cara-cara seperti menambah jam kerja, menambah tenaga kerja, menambah peralatan kerja, memilih sumber daya berkualitas, dan menggunakan metode konstruksi yang lebih efektif (Pratiwi et al., 2022). Metode TCTO dipilih dalam penelitian ini karena mampu menganalisis hubungan antara percepatan waktu dan penambahan biaya secara sistematis melalui konsep *cost slope*, sehingga alternatif percepatan yang dipilih benar-benar didasarkan pada pertimbangan efisiensi biaya, bukan sekadar mempercepat durasi proyek. Hal ini berbeda dengan metode lain seperti PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) yang lebih berfokus pada analisis probabilitas ketidakpastian durasi kegiatan, atau metode *Line of Balance* yang lebih sesuai untuk proyek dengan pekerjaan repetitif. Karena karakteristik proyek Jembatan No. 8 yang memiliki jalur kritis dan kebutuhan percepatan yang terukur, TCTO dinilai sebagai metode yang paling tepat karena dapat diintegrasikan langsung dengan *Critical Path Method* (CPM) untuk mengidentifikasi kegiatan pada lintasan kritis yang paling efisien untuk dipercepat. Konsep dari metode *Time Cost Trade Off* menjelaskan bahwa apabila waktu dari proyek konstruksi berubah, maka biaya yang dikeluarkan juga akan berubah (Fardila & Adwayah, 2021). Dalam perkembangan teknologi yang semakin pesat, perhitungan TCTO dapat dilakukan dengan alat bantu komputasi yang dapat mengolah data secara cepat dan sistematis. Salah satu alat bantu komputasi yang dapat digunakan adalah *Python*. *Python* dipilih sebagai

alat bantu komputasi karena bersifat *open-source*, didukung *library* yang lengkap seperti *openpyxl* untuk pengolahan data spreadsheet dan *matplotlib* untuk visualisasi grafik biaya-durasi, serta mampu mengotomatisasi perhitungan berulang seperti *cost slope* pada setiap alternatif percepatan. Dengan demikian, penggunaan *Python* dapat mempercepat proses analisis serta meningkatkan akurasi dan konsistensi hasil perhitungan TCTO pada Jembatan No. 8.

Pada masa perkembangan teknologi informasi saat ini, pemanfaatan berbagai bahasa pemrograman untuk analisis data, otomatisasi pekerjaan, dan komputasi semakin banyak dilakukan, termasuk dalam bidang teknik sipil. Terdapat banyak sekali jenis bahasa pemrograman yang saat ini digunakan, seperti *Java*, *JavaScript*, *C++*, dan lain-lain. Bahasa-bahasa pemrograman yang sudah disebutkan sebelumnya, memiliki kemampuan komputasi yang cepat, tetapi memiliki kompleksitas yang sangat tinggi. Seiring berjalannya perkembangan tersebut, kebutuhan dalam analisis data dan juga komputasi yang lebih mudah dan efisien semakin dibutuhkan. Salah satu solusi untuk kebutuhan tersebut adalah bahasa pemrograman *python*. *Python* merupakan sebuah bahasa pemrograman bersifat *open source* dan juga memiliki sintaks sederhana, sehingga *python* dapat digunakan dalam pengolahan dan perhitungan data (Maulana, 2024). Pada penelitian ini, pengintegrasian bahasa pemrograman *python* memungkinkan pengolahan data dilakukan dengan sistematis dan juga konsisten, terutama karena jumlah pekerjaan yang ditinjau berjumlah banyak. Dengan menggunakan pendekatan bahasa pemrograman *python*, pekerjaan yang termasuk pada jalur kritis dapat ditentukan dengan akurat dan cepat. Penggunaan bahasa pemrograman *python* dalam penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi perhitungan serta efisiensi perhitungan.

Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, terdapat permasalahan keterlambatan sekitar 2%, yang disebabkan oleh faktor kondisi alam yang tidak menentu dan juga faktor lingkungan sekitar. Meskipun persentase keterlambatan tersebut terlihat kecil, dampaknya tetap signifikan

mengingat skala proyek yang besar, di mana setiap hari keterlambatan dapat menimbulkan tambahan biaya tidak langsung serta risiko denda keterlambatan sesuai ketentuan kontrak. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya percepatan (*crashing*) yang dianalisis secara sistematis, guna memperoleh alternatif percepatan yang optimal dari segi waktu dan biaya. Struktur Jembatan No. 8 merupakan salah satu jembatan yang paling panjang pada Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1 dengan panjang 448 meter, dengan jumlah pekerjaan sebanyak 24 aktivitas pekerjaan. Melihat kondisi yang terjadi, perlu dilakukan analisis optimasi biaya dan juga waktu pada pembangunan Jembatan No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, dengan menggunakan metode TCTO. Dikarenakan jumlah data yang cukup banyak untuk dilakukan analisis, metode TCTO diintegrasikan dengan *python* dalam prosesnya, dengan alternatif pekerjaan penambahan jam kerja dan juga shift. Metode percepatan berupa penambahan jam kerja termasuk dengan shift, dipilih karena mempertimbangkan pemanfaatan tenaga kerja yang sudah memiliki pemahaman terhadap proyek yang dikerjakan, sehingga tidak perlu ada tahapan orientasi. Selain itu, jika dibandingkan dengan metode percepatan lain seperti penambahan tenaga kerja dan penambahan alat berat, akan menimbulkan masalah baru pada keterbatasan ruang kerja yang akan berdampak pada produktivitas tenaga kerja dan meningkatnya biaya manajemen juga mobilisasi. Hal ini juga mempertimbangkan jumlah pekerja yang digunakan sudah terhitung banyak, sehingga tidak perlu untuk dilakukan penambahan tenaga kerja. Dengan diintegrasikannya *python* dalam proses perhitungan TCTO, penentuan pekerjaan-pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis, perhitungan perhitungan *cost slope*, dan penentuan durasi dan biaya yang paling optimum dapat ter-otomasi dengan logika perhitungan *python* yang sudah diinput. Dengan begitu, proses perhitungan TCTO dapat dilakukan lebih akurat dan optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya, berikut merupakan beberapa rumusan masalah pada penelitian :

- a. Apa saja pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis berdasarkan analisis penjadwalan?
- b. Berapa durasi dan biaya yang paling optimal untuk menyelesaikan pekerjaan pembangunan jembatan no. 8 setelah dilakukan analisis TCTO terintegrasi dengan *python*?

1.3 Batasan Penelitian

Berikut merupakan beberapa batasan penelitian dalam penelitian ini :

- a. Penelitian hanya berfokus pada pembangunan struktur (substruktur dan superstruktur) jembatan no. 8, tidak membahas pembangunan elemen lain pada Proyek Jalan Tol Patimban Paket 1.
- b. Metode percepatan yang dilakukan hanya penambahan jam lembur dan penambahan shift kerja, tidak menggunakan metode percepatan lainnya
- c. Integrasi dengan *python* hanya dilakukan pada penentuan jalur kritis, penentuan *cost slope*, dan penentuan alternatif yang paling optimal, tidak diterapkan pada perhitungan *crash cost* dan *crash duration*.
- d. Biaya langsung dan tidak langsung tidak dirinci dan dicari berdasarkan data biaya total yang didapatkan dari proyek.
- e. Tidak merencanakan penjadwalan mulai dari awal, melainkan menyusun ulang penjadwalan yang sudah didapatkan dari proyek.

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut merupakan beberapa tujuan penelitian dalam penelitian ini :

- a. Untuk mengetahui aktivitas pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis berdasarkan analisis penjadwalan.
- b. Untuk mengetahui berapa durasi dan biaya yang paling optimal untuk menyelesaikan pekerjaan pembangunan jembatan no. 8 setelah dilakukan analisis TCTO dengan *python*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini, diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, yaitu sebagai berikut :

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai penggunaan *Python* dan metode TCTO dalam mengoptimasi biaya dan waktu pada sebuah proyek konstruksi.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi penggunaan bahasa pemrograman *Python* dan metode TCTO dalam melakukan optimasi biaya dan waktu pada proyek konstruksi.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penjadwalan Proyek Konstruksi

Penjadwalan proyek konstruksi merupakan salah satu hal yang sangat krusial dalam suatu proses perencanaan proyek konstruksi, karena dalam penjadwalan proyek, direncanakan waktu dari pelaksanaan aktivitas yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek konstruksi, mulai dari persiapan hingga selesai. Menurut (Husen, 2011), penjadwalan proyek merupakan sebuah hasil perencanaan proyek yang di dalamnya terdapat informasi mengenai jadwal perencanaan proyek, dan juga progress pelaksanaan proyek, yang berhubungan dengan kinerja sumber daya, seperti tenaga kerja yang dibutuhkan, biaya proyek, peralatan, material, dan juga rencana durasi penyelesaian dari proyek konstruksi yang sedang dilaksanakan. Dalam merencanakan penjadwalan proyek konstruksi, akan didasarkan pada harga pekerjaan yang sudah didapatkan, bobot dari pekerjaan, dan juga produktivitas pekerja. Pada umumnya, penjadwalan disajikan dalam bentuk *bar chart* atau *network planning*. Pada proses perencanaan penjadwalan proyek konstruksi, penyusunan aktivitas dan juga hubungan antar aktivitasnya akan dibuat dengan detail dan juga rinci, untuk mempermudah dalam hal evaluasi proyek konstruksi. Penjadwalan proyek merupakan bentuk pendistribusian waktu yang dibutuhkan dalam menyelesaikan aktivitas pekerjaan yang terdapat pada sebuah proyek konstruksi, dan dibuat dengan tujuan untuk mendapatkan hasil yang optimal dengan memperhatikan keterbatasan yang ada pada proses pelaksanaan proyek konstruksi. (Husen, 2011). Tingkat kerumitan pengelolaan penjadwalan proyek bergantung pada tingkat skala proyek. Jika skala proyek konstruksi yang dilaksanakan semakin besar, maka pengelolaan penjadwalan proyek akan semakin rumit. Hal tersebut dikarenakan oleh biaya yang semakin besar serta aktivitas konstruksi yang semakin banyak dan beragam. Oleh karena itu, diperlukan metode penjadwalan yang tepat, supaya didapatkan penjadwalan proyek konstruksi yang paling optimal.

2.2 Metode Penjadwalan Proyek Konstruksi

Metode penjadwalan proyek konstruksi merupakan salah satu aspek penting dalam manajemen proyek konstruksi, dikarenakan akan berperan dalam merencanakan urutan pekerjaan, durasi pekerjaan, serta hubungan antar pekerjaan yang diperlukan untuk menyelesaikan proyek konstruksi. Untuk mendapatkan penjadwalan yang paling optimal, diperlukan metode penjadwalan konstruksi yang sesuai. Jika penjadwalan proyek disusun dengan tepat, maka dapat memberikan gambaran waktu pelaksanaan proyek yang realistis dan juga dapat menjadi acuan dalam memantau progres pekerjaan dari sebuah proyek konstruksi tersebut. Menurut (Husen, 2011), terdapat empat metode penjadwalan proyek proyek konstruksi, yaitu, *barchart*, kurva S, penjadwalan linier, dan *network planning*.

2.3 Biaya Proyek Konstruksi

Selain penjadwalan, satu hal yang krusial dalam perencanaan proyek konstruksi. Proyek yang memiliki anggaran besar, memerlukan perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian yang baik, untuk mendapatkan hasil yang paling optimal (Elita Saragi & Uli Situmorang, 2022). Diperlukan analisis dalam pengendalian biaya, supaya biaya dapat sesuai dengan perencanaan dan tidak terjadi pembengkakan biaya (Rahmanto & Janizar, 2022). Biaya total dari proyek konstruksi, terbagi menjadi 2 jenis. Berikut merupakan 2 jenis dari biaya proyek konstruksi menurut (Fardila & Adwayah, 2021) :

2.1 Biaya Langsung

Biaya langsung mencakup biaya material, biaya upah pekerja, biaya subkontraktor, biaya peralatan, dan lain-lain. Biaya ini merupakan biaya yang melekat pada hasil akhir dari proyek konstruksi.

2.2 Biaya Tidak Langsung

Biaya tidak langsung mencakup biaya gaji staf, biaya peralatan konstruksi, biaya *overhead*, dan lain-lain. Biaya ini merupakan biaya yang tidak melekat pada hasil akhir dari proyek konstruksi. Menurut PERMEN-PUPR No. 8 Tahun 2023 Pasal 11 Ayat 3, biaya tidak langsung dihitung sebesar

11% hingga 15% dari biaya langsung. Di bawah ini merupakan rumus untuk menghitung biaya tidak langsung dari alternatif *crashing* :

$$a = \frac{\text{Biaya Tidak Langsung Normal}}{\text{Durasi Normal}} \times \text{Durasi Percepatan} \quad (2.1)$$

2.4 Critical Path Method

Critical Path Method merupakan salah satu metode penjadwalan yang disusun dengan menggunakan diagram panah untuk menentukan jalur kritis dari pekerjaan yang ditinjau (Fardila & Adwayah, 2021). *Critical Path Method* berfokus pada penentuan rangkaian aktivitas yang memiliki durasi panjang dan tidak terdapat *float* pada rangkaian pekerjaan tersebut, dengan kata lain berfokus pada rangkaian pekerjaan yang jika di dalamnya terdapat keterlambatan, maka akan berdampak pada durasi penyelesaian proyek konstruksi secara keseluruhan. Metode *Critical Path Method*, dapat berguna untuk mendapatkan perkiraan durasi yang diperlukan dalam penyelesaian proyek konstruksi. Selain itu, metode *Critical Path Method* berguna untuk menentukan prioritas dari masing-masing pekerjaan, sehingga pekerjaan dapat diselesaikan dengan optimal dan sesuai dengan perencanaan awal (Sa'adah et al., 2021). Menurut (Sinurat & Misdalena, 2024), dalam identifikasi jalur kritis melibatkan 3 jenis perhitungan, yaitu perhitungan maju, perhitungan mundur, dan perhitungan total *float* / kelonggaran. Menurut (Sinurat & Misdalena, 2024), berikut merupakan penjelasan untuk masing-masing perhitungan :

1. Perhitungan Maju

Pada perhitungan maju, terdapat dua variable, yaitu ES (*Earliest Start*) dan EF (*Earliest Finish*). ES (*Earliest Start*) merupakan waktu terdahulu di mana kegiatan dapat dimulai, ketika kegiatan sebelumnya sudah selesai, sedangkan EF (*Earliest Finish*) merupakan waktu paling awal kegiatan dapat selesai (Sa'adah et al., 2021). ES (*Earliest Start*) dan EF (*Earliest Finish*) dapat didapatkan dengan cara berikut :

ES (*Earliest Start*) = EF (*Earliest Finish*) terbesar dari predesesor (aktivitas pendahulu)

EF (*Earlist Finish*) = ES (*Earlist Start*) + Durasi Pekerjaan

2. Perhitungan Mundur

Pada perhitungan mundur, terdapat dua variable, yaitu LS (*Latest Start*) dan LF (*Latest Finish*). LS (*Latest Start*) merupakan paling akhir di mana kegiatan dapat dimulai,, sedangkan LF (*Latest Finish*) merupakan waktu paling akhir kegiatan dapat selesai (Sa'adah et al., 2021). ES (*Earliest Start*) dan EF (*Earliest Finish*) dapat dihitung dengan rumus berikut :

LS (*Latest Start*) = LF (*Latest Finish*) – Durasi Pekerjaan

LF (*Latest Finish*) = LS (*Latest Start*) terkecil dari suksesor (aktivitas sesudah)

3. Perhitungan *Float*

Float merupakan waktu yang dapat ditunda dalam suatu aktivitas pekerjaan tanpa berpengaruh pada durasi penyelesaian keseluruhan proyek konstruksi (Sinurat & Misdalena, 2024). *Float* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

TF (*Total Float*) = LF (*Latest Finish*) – EF (*Earliest Finish*)

2.5 *Time Cost Trade Off*

Pada pembangunan proyek konstruksi, seringkali mengalami kendala seperti keterlambatan penjadwalan proyek. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan pengendalian proyek konstruksi yang tepat dan juga baik. Salah satu hal yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan percepatan durasi proyek konstruksi. Metode yang dapat digunakan dalam melakukan percepatan durasi proyek, adalah metode *Time Cost Trade Off*. Metode *Time Cost Trade Off* merupakan sebuah metode yang bekerja dengan melakukan percepatan pada penjadwalan proyek, untuk mendapatkan waktu dan biaya yang lebih optimal (Hendriyani et al., 2020). Jika dilakukan percepatan pada penjadwalan proyek konstruksi, maka biaya langsung dari proyek konstruksi tersebut akan bertambah, sedangkan biaya tidak langsung proyek akan berkurang (Setiawan et al., 2021). Menurut (Pratiwi et al., 2022). terdapat beberapa cara untuk mengimplementasikan metode *Time Cost Trade Off* pada sebuah proyek konstruksi, beberapa cara tersebut adalah sebagai berikut :

1. Penambahan jumlah jam kerja.

Penambahan jumlah jam kerja atau lembur, bertujuan untuk mempercepat proses penyelesaian sebuah pekerjaan dengan menambah produksi pekerjaan.

2. Penambahan jumlah tenaga kerja.

Penambahan jumlah tenaga kerja, dilaksanakan dengan menambahkan jumlah tenaga kerja dalam suatu pekerjaan, tanpa menambah jumlah dari jam kerja atau lembur.

3. Penambahan peralatan kerja.

Penambahan peralatan kerja bertujuan untuk menambah produktivitas dari suatu pekerjaan yang ditinjau, dengan menambah atau juga mengganti peralatan pekerjaan yang lebih efisien.

4. Pemilihan sumber daya manusia yang berkualitas.

Poin ini sangat perlu untuk diperhatikan, dikarenakan sumber daya manusia merupakan garis pertama yang berhadapan dengan pekerjaan lapangan. Dengan memilih sumber daya manusia yang lebih berkualitas, maka pekerjaan akan lebih cepat untuk diselesaikan.

5. Pemilihan metode pelaksanaan konstruksi yang lebih efektif.

Metode pelaksanaan dari sebuah proyek konstruksi disusun dengan memperhatikan beberapa hal, seperti kondisi lingkungan sekitar dan juga kebutuhan bahan.

2.6 Produktivitas Pekerja

Produktivitas pekerja merupakan salah satu unsur penting dalam menjalankan suatu proyek konstruksi supaya dapat mencapai target waktu, biaya, dan mutu yang sesuai. Produktivitas merupakan rasio antara hasil produksi dan juga sumber daya yang digunakan (Fardila & Adwayah, 2021). Pada sebuah proyek konstruksi, rasio dari produktivitas dapat dibagi menjadi 3, yaitu : biaya material, biaya tenaga kerja, dan juga metode pelaksanaan. Nilai tersebut dapat diukur selama proses proyek konstruksi berjalan (Pratiwi et al., 2022). Pada sebuah proyek konstruksi, waktu normal pekerjaan dalam satu hari adalah 7 jam kerja. Dan dapat dilaksanakan lembur atau penambahan jam kerja

setelahnya. Waktu lembur dapat ditambahkan sebanyak 1-4 jam, tetapi tetap perlu pertimbangan lebih lanjut, dikarenakan produktivitas pekerja juga dapat menurun dikarenakan oleh penambahan waktu jam kerja. Tingkat efektivitas pengelolaan sumber daya manusia, sangat mempengaruhi keberhasilan penyelesaian sebuah proyek konstruksi, dikarenakan setiap pekerja memiliki karakter yang berbeda (Pratiwi et al., 2022). Perhitungan produktivitas pekerja akan digunakan dalam mencari nilai *crash cost* dan juga *crash duration* dari setiap pekerjaan yang akan dilakukan percepatan dengan metode penambahan jam kerja. Berikut merupakan beberapa rumusan dari produktivitas pekerja menurut (Fardila & Adwayah, 2021):

- Produktivitas Harian

$$a = \frac{\text{Volume}}{\text{Durasi Normal}} \quad (2.2)$$

- Produktivitas Tiap Jam

$$b = \frac{\text{Produktivitas Harian}}{\text{Jam Kerja per Hari}} \quad (2.3)$$

- Produktivitas Harian Setelah *Crashing*

$$P = (\text{Jam Kerja per Hari} \times b) + (x \times y \times b) \quad (2.4)$$

Keterangan :

$x = \text{Durasi Lembur}$

$y = \text{Koefisien Penurunan Produktivitas}$

2.7 Penambahan Jam Lembur

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mempercepat penyelesaian proyek konstruksi adalah dengan menambah jam kerja di luar jam kerja normal atau yang dikenal dengan istilah lembur. Penambahan jam lembur merupakan metode percepatan yang paling umum diterapkan karena tidak memerlukan penambahan tenaga kerja baru, sehingga tenaga kerja yang digunakan tetap merupakan pekerja yang sudah terbiasa dan memahami kondisi lapangan. Durasi lembur memiliki batas maksimal dilakukan 4 jam dalam satu hari, hal ini merujuk pada PP No. 35 Tahun 2021 Pasal 26 Ayat 1. Upah yang harus

dibayarkan sebesar 1,5 kali upah satu jam untuk untuk 1 jam lembur dan 2 kali upah satu jam untuk jam lembur berikutnya (Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia, 2004). Merujuk pada (Hendriyani et al., 2020), berikut merupakan rumus untuk mencari *Crash Duration* jam lembur :

$$a = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{((b \times \text{Jam Kerja per Hari}) + (\text{Jam Lembur} \times z \times b))} \quad (2.5)$$

Keterangan :

b = Produktivitas per Jam

z = Koefisien Penurunan Produktivitas

Koefisien penurunan produktivitas, perlu diperhitungkan, dikarenakan produktivitas jam lembur akan terpengaruh oleh beberapa faktor, salah satunya seperti kelelahan. Merujuk pada (Fardila & Adwayah, 2021), tabel 2.1 menampilkan koefisien penurunan produktivitas jam lembur untuk masing-masing kondisi :

Tabel 2.1 Koefisien Penurunan Produktivitas Jam Lembur

Jam Lembur	Penurunan Indeks	Persentase Prestasi
	Produktivitas	Kerja
1 Jam	0,9	90
2 Jam	0,8	80
3 Jam	0,7	70
4 Jam	0,6	60

Di bawah ini merupakan beberapa rumus tahapan dalam mencari *Crash Cost* penambahan jam lembur berdasarkan (Rajagukguk et al., 2026), yang merujuk pada Kepmenakertrans No. KEP.102/MEN/VI/2004 :

- Upah Lembur 1 jam

$$a = 1,5 \times \text{Upah per Jam} \quad (2.6)$$

- Upah Lembur 2 Jam

$$b = (1,5 \times \text{Upah per Jam}) + (2 \times 1 \times \text{Upah per Jam}) \quad (2.7)$$

- Total Upah Lembur

$$c = \text{Jumlah Pekerja} \times \text{Upah Lembur} \times \text{Durasi Percepatan} \quad (2.8)$$

- Biaya Percepatan (*Crash Cost*)

$$d = \text{Biaya Normal} + \text{Total Upah lembur} \quad (2.9)$$

2.8 Penambahan *Shift* Kerja

Selain penambahan jam lembur, metode percepatan lain yang dapat diterapkan pada proyek konstruksi adalah dengan penerapan *shift* kerja. *Shift* kerja merupakan sistem pembagian waktu kerja dalam satu hari menjadi beberapa sesi atau giliran,. Pada umumnya, penerapan *shift* kerja dalam proyek konstruksi membagi waktu pelaksanaan menjadi dua *shift*, yaitu *shift* pagi dan *shift* malam, dengan masing-masing *shift* memiliki durasi 8 jam kerja efektif. *Shift* kerja memanfaatkan kelompok tenaga kerja yang berbeda pada setiap sesinya, sehingga faktor kelelahan fisik dapat diminimalkan. Meskipun demikian, perlu diperhatikan bahwa produktivitas *shift* malam tidak dapat disamakan dengan *shift* pagi karena terdapat faktor penurunan produktivitas. Menurut (Rabbani & Supriyadi, 2022) produktivitas pada *shift* kedua digunakan penurunan sebesar 11% untuk dapat melakukan percepatan dengan meminimalisir pertambahan biaya, serta upah dari *shift* kerja malam akan ditambah 15% dari upah normal. Oleh karena itu, faktor penurunan produktivitas ini harus diperhitungkan dalam menentukan *crash duration* dan *crash cost* pada alternatif percepatan *shift* kerja. Berikut merupakan rumus untuk menentukan produktivitas *shift* kerja dan *crash duration* :

- Produktivitas *Shift* Kerja

$$a = y + (y - (y \times 11\%)) \quad (2.10)$$

Keterangan :

y = Produktivitas Harian

- *Crash Duration Shift* Kerja

$$b = \frac{\text{Volume Pekerjaan}}{\text{Produktivitas Shift Kerja}} \quad (2.11)$$

Di bawah ini merupakan beberapa rumus tahapan dalam mencari *Crash Cost* penambahan *shift* kerja

- Upah *Shift* Malam

$$a = \text{Upah Normal} + (15\% \times \text{Upah Normal}) \quad (2.12)$$

- Total Upah *Shift*

$$b = \text{Jumlah Pekerja} \times \text{Upah Shift} \quad (2.13)$$

- Biaya Percepatan (*Crash Cost*)

$$c = \text{Biaya Normal} + (\text{Durasi Percepatan} \times \text{Total Upah}) \quad (2.14)$$

2.9 Python

Python merupakan bahasa pemrograman yang banyak digunakan dalam berbagai bidang karena mudah untuk dipahami dan dapat diintegrasikan. *Python* juga merupakan bahasa pemrograman dengan tingkat yang termasuk tinggi yang memiliki sistem sintaks sederhana dan juga memiliki struktur yang dapat mendukung pembelajaran intuitif (Andra et al., 2025). *Python* dapat digunakan sebagai alat bantu komputasi untuk pengolahan data dan juga perhitungan kompleks. *Python* juga dapat disambungkan dengan bermacam-macam *libraries* yang dapat membantu dalam pengolahan data, sehingga dapat digunakan secara lebih mudah. Selain itu, *python* juga tidak memerlukan sistem operasi komputer yang tinggi untuk dijalankan, sehingga ramah untuk digunakan oleh seluruh jenis pengguna, termasuk yang menggunakan sistem operasi komputer sederhana. Salah satu keunggulan *python* adalah, adanya *library* yang sangat beragam dan dapat menunjang kebutuhan dalam penggunaan *python*. *Library* seperti NumPy berguna untuk memanipulasi data berbasis *array* homogen, Pandas berguna untuk memanipulasi data heterogen dan juga berlabel, Matplotlib untuk memvisualisasikan data, dan masih banyak lainnya (VanderPlas, 2016). Dikarenakan fleksibilitas yang dihadirkan tersebut, *python* menjadi standar dalam siklus inovasi teknologi pada berbagai sektor global (Lutz, 2009)

2.10 Cost Slope

Cost Slope perlu diperhitungkan, hal tersebut dikarenakan untuk memperhitungkan biaya tambahan yang dibutuhkan untuk melakukan percepatan per satuan waktu (Rajagukguk et al., 2026). Rumus untuk perhitungan *cost slope* dilampirkan di bawah ini :

$$a = \frac{\text{Biaya Percepatan} - \text{Biaya Normal}}{\text{Durasi Normal} - \text{Durasi Percepatan}} \quad (2.15)$$

2.11 Microsoft Project

Microsoft Project merupakan salah satu perangkat lunak yang sering digunakan dalam manajemen proyek yang dikembangkan dan didistribusikan oleh perusahaan *Microsoft*. Pada perencanaan proyek konstruksi, *Microsoft Project* digunakan dalam perencanaan, penjadwalan, pengendalian sumber daya, dan juga evaluasi kinerja proyek konstruksi. Selain itu, *Microsoft Project* dapat membantu dalam pengembangan rencana, pengelolaan anggaran proyek, penetapan sumber daya yang digunakan, dan penentuan bobot pekerjaan (Sulistyo & Al Fikri, 2021). Dalam melakukan *scheduling* atau perencanaan penjadwalan, *Microsoft Project* dapat mempermudah proses tersebut, dikarenakan perangkat lunak ini memiliki sistem metode manajemen proyek konstruksi seperti CPM (*Critical Path Method*), *Gantt Chart*, dan juga PERT (*Program Evaluation Review Technique*) (Fardila & Adwayah, 2021). Secara keseluruhan, *Microsoft Project* dapat membantu proses perencanaan penjadwalan proyek konstruksi menjadi lebih efisien dan cepat, serta dapat memberikan informasi mengenai biaya proyek konstruksi tersebut. Penyesuaian atau modifikasi kembali juga mudah untuk dilakukan, dikarenakan sistem *Microsoft Project* yang sudah terintegrasi. Pada *Microsoft Project*, pengguna dapat mengatur dependensi atau hubungan antara pekerjaan dan juga independensi pekerjaan atau pekerjaan yang tidak memiliki hubungan dan dapat dilaksanakan tanpa bergantung satu sama lain. Selain itu, dalam *Microsoft Project*, pengguna dapat mengatur predesesor atau aktivitas pendahulu dan juga suksesor atau aktivitas sesudah dari aktivitas yang sedang ditinjau. Dengan

fitur-fitur tersebut, penjadwalan proyek dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien



2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu disajikan pada tabel 2.2 sebagai berikut :

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

Peneliti dan Tahun	Judul	Tujuan Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
(Fardila & Adwayah, 2021)	Optimasi Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi dengan Lembur dan Penambahan Tenaga Kerja	Menemukan biaya dan waktu yang paling optimal pada proyek konstruksi.	Metode TCTO dengan bantuan <i>Microsoft Project</i> .	Ditemukan biaya dan waktu optimum, yaitu Rp 8.429.832.759 dan 226 hari untuk penambahan tenaga kerja. Serta didapatkan Rp 8.438.038.832 dan 235 hari untuk penambahan jam lembur	Penelitian terdahulu terbatas pada penggunaan <i>Microsoft project</i> dalam penentuan jalur kritis, serta tidak membahas percepatan dengan menggunakan shift. Pada penelitian ini, perhitungan TCTO dengan integrasi <i>python</i> serta <i>Microsoft project</i> untuk proses validasi penentuan jalur kritis.
(Hendriyani et al., 2020)	Optimasi Waktu dan Biaya Pada Pelaksanaan Proyek Peningkatan Jalan Bina Bakti Kelurahan Gunung Seteleng Kabupaten Paser Utara Dengan Metode <i>Time Cost Trade Off</i> (TCTO)	Mencari waktu dan biaya yang paling optimal pada proyek konstruksi peningkatan jalan.	Menentukan waktu dan biaya yang paling optimal dengan menggunakan metode TCTO, dengan percepatan berupa penambahan jam kerja dan tenaga kerja.	Didapatkan waktu dan biaya yang paling optimal, yaitu 37,8 hari dan Rp 1.215.485.807,44 untuk penambahan tenaga kerja. Untuk penambahan jam lembur didapatkan waktu dan biaya sebesar 42,4 hari dan Rp 1.220.695.370,54.	Penelitian terdahulu masih menggunakan cara manual dalam penentuan jalur kritis, yaitu dengan menggunakan jaringan kerja proyek. Penelitian ini mengintegrasikan <i>python</i> serta <i>microsoft project</i> dalam proses perhitungan metode TCTO

DIGITAL REPOSITORY UNIVERSITAS JEMBER

(Sulistyo & Al Fikri, 2021)	Analisis Optimasi Waktu dan Biaya Proyek Konstruksi Menggunakan Metode <i>Time Cost Trade Off</i> (Studi Kasus : Proyek Pembangunan Jalan Gorda-Bandung)	Mendapatkan waktu dan biaya yang paling optimal dalam menyelesaikan proyek konstruksi.	Menggunakan metode TCTO dalam mencari waktu dan biaya yang paling optimal, dengan metode percepatan yaitu penambahan waktu lembur dan juga shift kerja. Dengan menggunakan bantuan <i>microsoft project</i> .	Ditemukan waktu dan biaya paling optimal, yaitu 105 hari dan Rp 501.838.000, untuk penggunaan 2 shift kerja.	Penelitian terdahulu hanya memanfaatkan <i>output microsoft project</i> . Pada penelitian ini, penentuan jalur kritis dilakukan pengembangan dengan menggunakan <i>python</i> , sehingga dapat dilakukan dengan lebih efisien dan terintegrasi.
(Elita Saragi & Uli Situmorang, 2022)	Optimasi Waktu dan Biaya Percepatan Proyek Menggunakan Metode <i>Time Cost Trade Off</i> dengan Alternatif Penambahan Tenaga Kerja dan Jam Kerja (Lembur) (Studi Kasus : Pembangunan Gedung Convention Hall Kab. Deli Serdang)	Mencari waktu dan juga biaya yang paling optimal.	Biaya dan waktu optimal dicari dengan menggunakan metode TCTO, dengan alternatif percepatan berupa penambahan tenaga kerja dan penambahan jam kerja, dengan menggunakan alat bantu <i>microsoft project</i> .	Ditemukan biaya dan waktu yang paling optimal adalah Rp 6.939.030.814 dan 232 hari, dengan alternatif percepatan penambahan tenaga kerja.	Penelitian sebelumnya hanya menggunakan <i>software bantu microsoft project</i> dalam pengerjaannya. Penelitian ini, mengisi gap tersebut dengan mengotomasi perhitungan TCTO dengan menggunakan <i>python</i> dan juga validasi ulang dengan menggunakan <i>microsoft project</i> dalam penentuan jalur kritis.

DIGITAL REPOSITORY UNIVERSITAS JEMBER

(Pratiwi et al., 2022)	Optimasi Waktu dan Biaya dengan Metode <i>Time Cost Trade Off</i> (TCTO) Pada Proyek Penambahan Bangunan Pasar Rakyat	Menemukan waktu dan biaya yang paling optimum setelah dilakukan alternatif percepatan dengan metode TCTO.	Penelitian dilakukan dengan menggunakan alternatif percepatan penambahan jam kerja dan penambahan tenaga kerja, dengan menggunakan <i>software microsoft project</i> .	Didapatkan biaya dan waktu optimum adalah Rp 634.106.512 dan 123,62 hari, dengan menggunakan alternatif percepatan penambahan tenaga kerja.	Penelitian sebelumnya berfokus pada penerapan alternatif percepatan dengan bantuan <i>microsoft project</i> . Penelitian ini, mengisi gap dengan menerapkan integrasi dengan <i>python</i> perhitungan metode TCTO serta dalam tahapan penentuan jalur kritis dan divalidasi dengan <i>microsoft project</i> .
------------------------	---	---	--	---	--

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 memperlihatkan tampak lokasi penelitian dan tampak atas objek penelitian.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

(Sumber : PT Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk.)



Gambar 3.2 Jembatan No. 8 Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1

Gambar 3.2 menunjukkan tampak atas dari pembangunan jembatan no. 08 yang terletak pada Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1.

3.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder. Data sekunder yang digunakan bersumber dari dokumen proyek, analisa harga satuan pekerjaan, dan juga harga satuan dasar Kabupaten Subang. Jenis dari data-data sekunder yang digunakan antara lain adalah :

- a. Penjadwalan pekerjaan jembatan no. 8
- b. RAB dan volume pekerjaan jembatan no. 8
- c. Harga satuan tenaga kerja
- d. Koefisien tenaga kerja (AHSP)

3.3 Tahapan Penelitian

Pada pelaksanaan penelitian ini, diterapkan beberapa tahapan penelitian, supaya penelitian dapat berjalan dengan runtut dan sistematis, serta dapat menghasilkan hasil yang diinginkan. Berikut merupakan beberapa tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini :

- a. Tahapan Pengumpulan Data

Pada tahapan ini, dilakukan pengumpulan data sekunder berupa penjadwalan pekerjaan jembatan no. 8, RAB pekerjaan jembatan no. 8, dan harga satuan pekerja.

- b. Tahapan Penyusunan Ulang Penjadwalan

Pada tahapan ini, dilakukan penyusunan penjadwalan berdasarkan penjadwalan yang sudah didapatkan dari proyek dengan mempertimbangkan produktivitas pekerja dan juga volume dari pekerjaan yang ditinjau untuk menentukan penjadwalan pekerjaan dan juga durasi.

- c. Tahapan Penentuan Jalur Kritis

Menentukan jalur kritis dengan menggunakan *Python* dan divalidasi dengan menggunakan *Microsoft project*. Dari tahapan ini, akan didapatkan jalur kritis, yaitu alur pekerjaan yang tidak dapat ditunda, dikarenakan akan sangat berdampak pada waktu total penyelesaian

proyek konstruksi. Berikut merupakan beberapa tahapan dalam menentukan jalur kritis :

- Menentukan urutan pekerjaan mulai dari awal hingga akhir.
- Menginput durasi dari setiap pekerjaan yang ditinjau.
- Menginput hubungan antar pekerjaan yang ditinjau.
- Mencari nilai total *float* dari setiap pekerjaan yang ditinjau.
- Menentukan pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis.

d. Tahapan Perhitungan Durasi *Crash* dan Biaya *Crash*

Selanjutnya, dilakukan perhitungan durasi dan juga biaya *crash*. Durasi *crash* merupakan durasi setelah dilakukan percepatan berupa penambahan jam lembur dan *shift* kerja, dan biaya *crash* merupakan biaya yang dibutuhkan setelah dilakukan percepatan.

e. Tahapan Perhitungan *Cost Slope*

Setelah durasi dan biaya *crash* sudah didapatkan, dilakukan perhitungan *cost slope* yang diintegrasikan dengan *python*. *Cost slope* merupakan biaya langsung yang dibutuhkan dalam sehari untuk melakukan percepatan.

f. Tahapan Penentuan Kebutuhan Biaya Langsung dan Tidak Langsung

Setelah jalur kritis, durasi *crash*, biaya *crash*, dan *cost slope* sudah ditentukan, dilakukan perhitungan kebutuhan biaya langsung dan tidak langsung dari masing-masing alternatif.

g. Tahapan Penentuan Durasi dan Biaya Paling Optimal

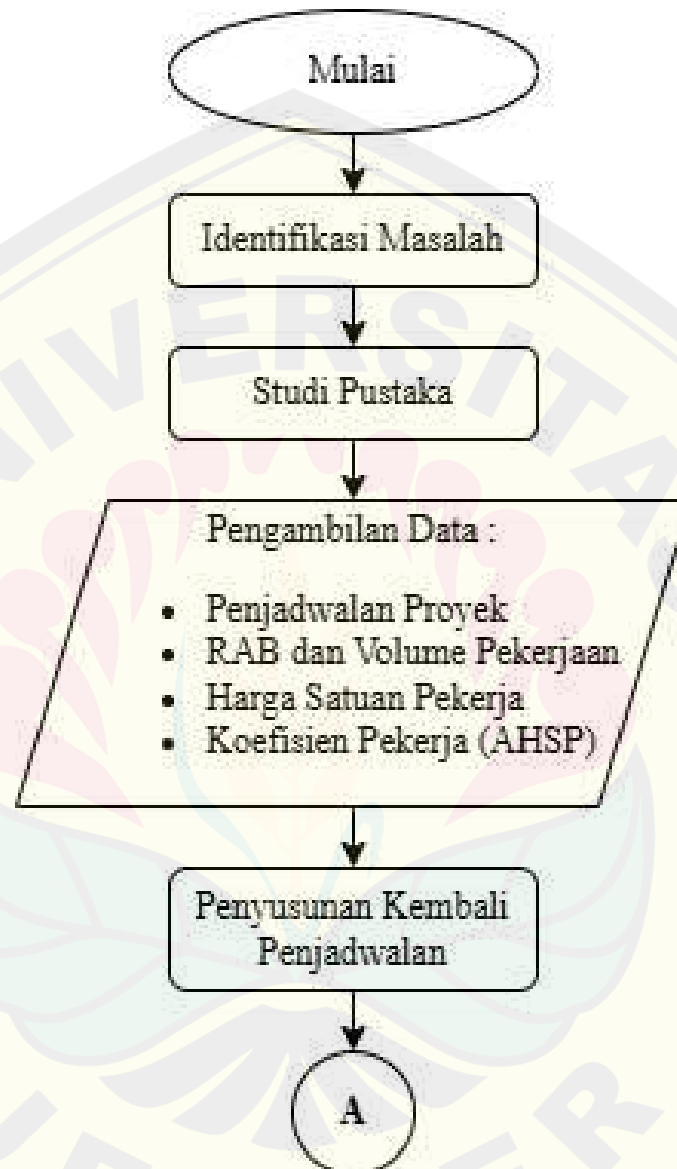
Setelah biaya langsung dan tidak langsung dari masing-masing alternatif sudah didapatkan, dibuat grafik hubungan antara biaya dan waktu dengan mengintegrasikan dengan *python*, serta ditentukan durasi dan biaya yang paling optimal.

h. Tahapan Pembahasan Hasil dan Kesimpulan

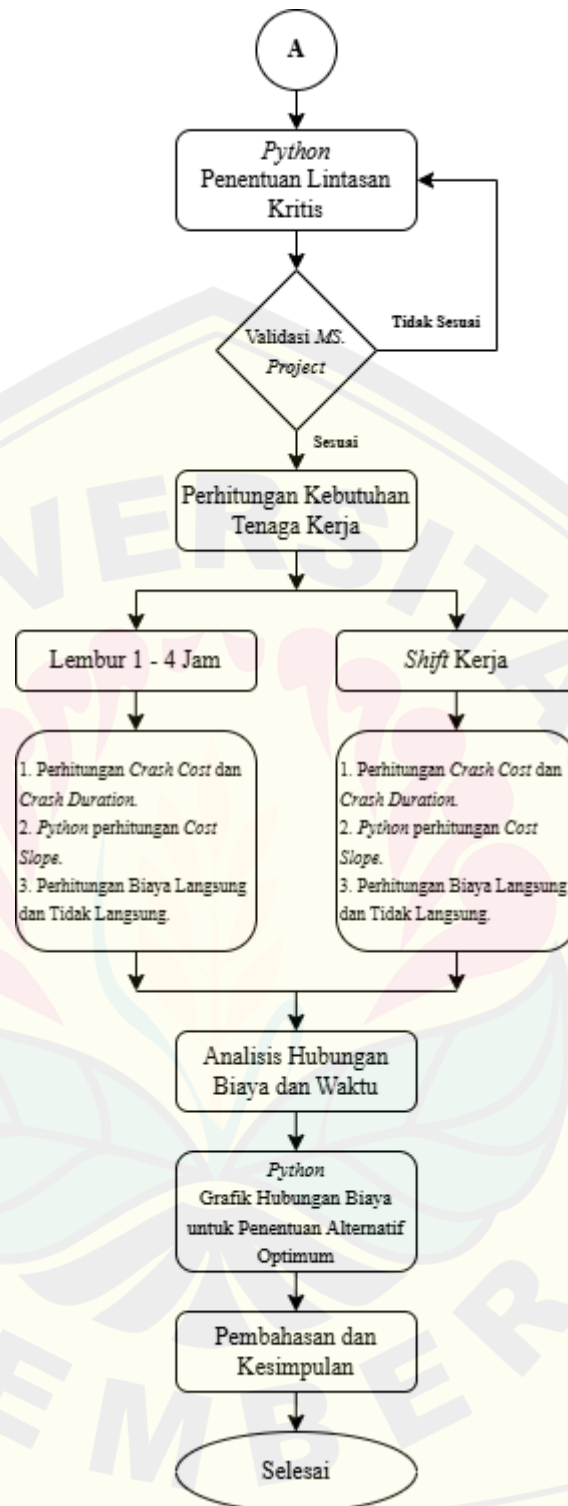
Setelah perhitungan selesai dilakukan, hasil perhitungan dijelaskan dan diambil kesimpulan dari hasil perhitungan yang sudah dilakukan.

3.4 Bagan Alir Penelitian

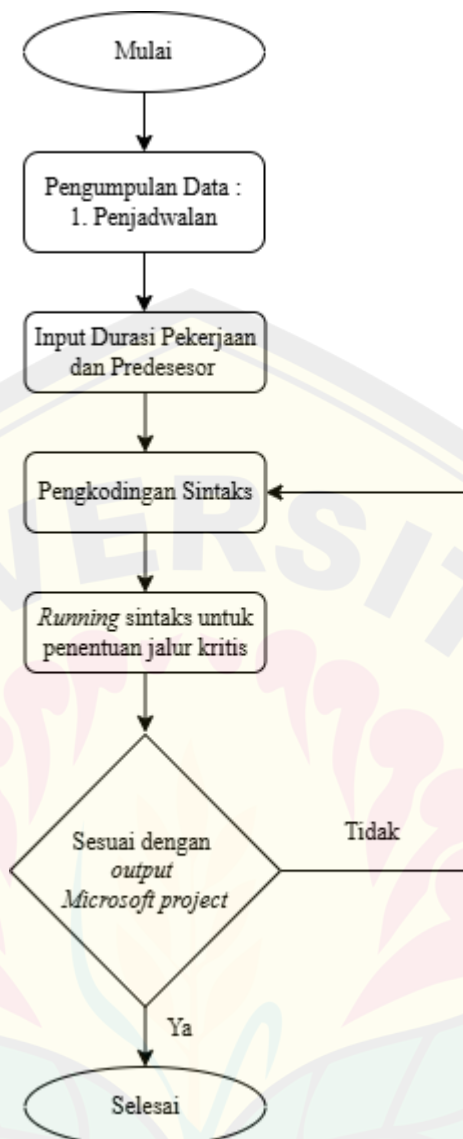
Gambar 3.3 dan 3.4 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan mulai dari awal hingga selesai.



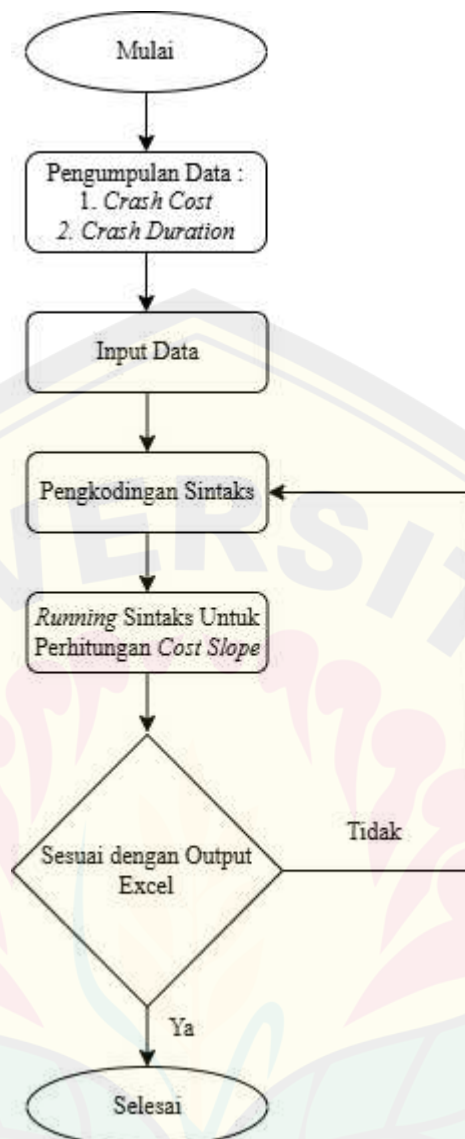
Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian



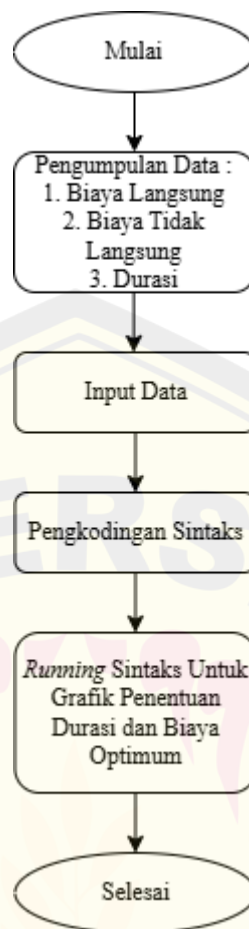
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.5 Diagram Alir *Python* Penentuan Jalur Kritis



Gambar 3.6 Diagram Alir Python Cost Slope



Gambar 3.7 Diagram Alir *Python* Grafik Hubungan Biaya dan Waktu

3.5 Matriks Penelitian

Matriks penelitian terlampir pada Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1 Tabel Matriks Penelitian

Judul	Latar Belakang	Tujuan Penelitian	Variabel	Jenis Data	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
ANALISIS OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA PADA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE <i>TIME COST TRADE OFF</i> INTEGRASI DENGAN <i>PYTHON</i>	Diperlukan optimasi untuk mendapatkan waktu dan biaya yang paling optimal untuk menyelesaikan proyek konstruksi.	a. Untuk mengetahui aktivitas pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis dengan menggunakan metode <i>Critical Path Method</i> b. Untuk mengetahui berapa durasi pekerjaan proyek yang paling optimal setelah dilakukan percepatan.	Pekerjaan pembangunan jembatan no. 8, Proyek Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1.	Data Sekunder : a. Penjadwalan pekerjaan jembatan no. 8 b. RAB dan volume pekerjaan jembatan no. 8 c. Harga satuan tenaga kerja d. Koefisien tenaga kerja (AHSP)	Optimasi waktu dan biaya menggunakan metode TCTO, diintegrasikan dengan bahasa pemrograman <i>python</i> .	Waktu dan biaya percepatan yang paling optimal untuk menyelesaikan proyek konstruksi.

DIGITAL REPOSITORY UNIVERSITAS JEMBER

		c. Untuk mengetahui berapa biaya pekerjaan proyek yang paling optimal setelah dilakukan percepatan.				
--	--	---	--	--	--	--

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Umum Pembangunan Proyek

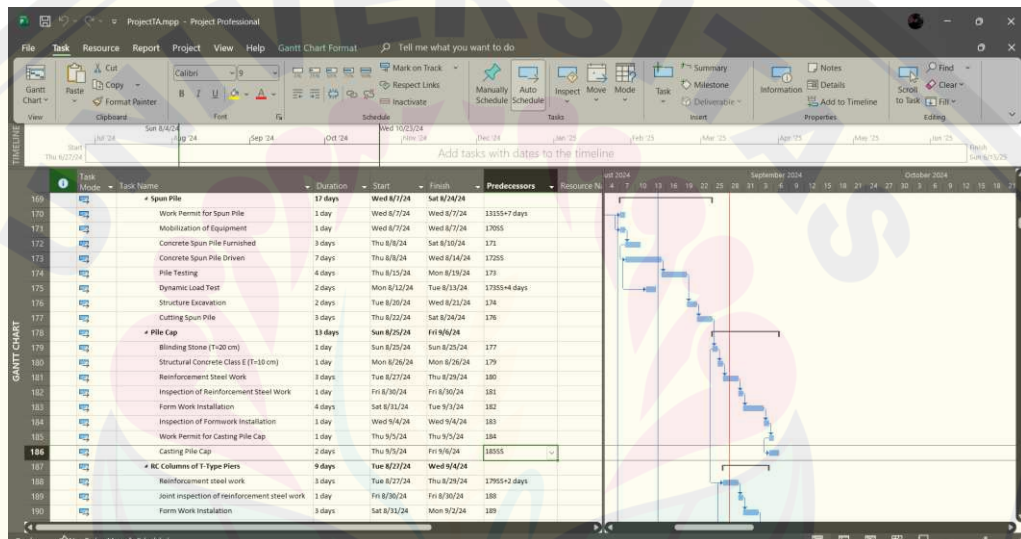
Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1 berlokasi di Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Pada proyek ini, PT Pembangunan Perumahan (Persero) berperan sebagai kontraktor utama, dengan nilai kontrak sebesar Rp 1.006.142.314.133,47. Pembangunan proyek mengalami keterlambatan sebesar 2%. Jembatan No. 08 sendiri merupakan salah satu bagian dari Pembangunan Jalan Tol Akses Patimban Paket 1, yang memiliki total biaya pembangunan struktur sebesar Rp 88.386.871.932,42 dan juga durasi penyelesaian struktur selama 341 hari untuk keseluruhan pekerjaan substruktur dan juga superstruktur. Durasi kerja dari proyek dalam sehari adalah 8 jam. Dimulai dari jam 08.00 hingga 17.00, dengan 1 jam istirahat Pada Tabel 4.1, dilampirkan rencana anggaran biaya dari pekerjaan struktur pada Jembatan No. 08

Tabel 4. 1 Rencana Anggaran Biaya Pekerjaan Struktur Jembatan No. 08

URAIAN	VOLUME	SATUAN	HARSAT	JUMLAH HARGA
Pretensioned Spun Pile Type A3, Furnished	15,454.57	m	Rp 1,053,626.00	Rp 16,283,336,770.82
Pretensioned Spun Pile Type A3, Driven	15,454.57	m	Rp 137,810.00	Rp 2,129,794,291.70
Structure Excavation 0-2 m	3,713.58	m3	Rp 46,735.00	Rp 173,554,095.87
Structure Excavation 2-4 m	17.95	m3	Rp 77,042.00	Rp 1,382,903.90
Blinding Stone	370.62	m3	Rp 281,900.00	Rp 104,477,778.00
Levelling Concrete	185.02	m3	Rp 1,302,643.00	Rp 241,015,007.86
Footing - Concrete Class C1	2,422.08	m3	Rp 2,080,925.00	Rp 5,040,166,824.00
Pier Column - Concrete Class B1	697.03	m3	Rp 2,551,721.00	Rp 1,778,623,230.70
Pier Head - Concrete Class B1	1,203.85	m3	Rp 5,250,874.00	Rp 6,321,254,163.15
RC Slab - Concrete Class B1	8,215.06	m3	Rp 1,925,935.00	Rp 15,821,666,766.26
Reinforcing BJTS 420B	2,657,792.85	kg	Rp 14,612.00	Rp 38,835,669,153.42
Bearing Pad 500x200x38 (mov)	580.00	bh	Rp 962,753.00	Rp 558,396,740.00
Bearing Pad 500x200x29 (fix)	580.00	bh	Rp 802,296.00	Rp 465,331,680.00
Angkur	25,551.80	kg	Rp 24,742.00	Rp 632,202,526.74
TOTAL				Rp 88,386,871,932.42

4.2 Penyusunan Kembali Penjadwalan Proyek

Dalam tahapan ini, dilakukan penyusunan kembali penjadwalan ulang proyek yang sudah didapatkan dan berupa file PDF. Penjadwalan yang disusun ulang merupakan penjadwalan eksisting pada proyek, sehingga tidak memperhitungkan durasi ulang. Penjadwalan proyek yang akan disusun kembali memiliki total durasi sebanyak 341 hari untuk pembangunan struktur jembatan no. 08. Penjadwalan proyek akan disusun ulang pada *Microsoft project*, yang nantinya akan digunakan untuk proses validasi dalam tahapan penentuan jalur kritis.



Gambar 4.1 Proses Penyusunan Kembali Penjadwalan Proyek

Pada Gambar 4.1, diperlihatkan proses penyusunan kembali penjadwalan proyek pada *Microsoft project*. Tahapan penyusunan jadwal tersebut diawali dengan memasukkan nama aktivitas pekerjaan sesuai dengan uraian pekerjaan pada proyek yang ditinjau. Selanjutnya, dilakukan pengisian durasi masing-masing aktivitas berdasarkan penjadwalan asli proyek. Setelah nama dan durasi aktivitas dimasukkan, tahap berikutnya adalah menentukan hubungan keterkaitan antar aktivitas (predesesor) untuk menggambarkan urutan logis pelaksanaan pekerjaan, sehingga *Microsoft project* dapat secara otomatis menghitung jalur kritis (*critical path*) serta total durasi penyelesaian proyek. Predesesor diatur supaya sesuai dan masuk akal dengan penjadwalan asli

proyek. Untuk keseluruhan penjadwalan yang sudah disusun pada *Microsoft project* akan dilampirkan pada lampiran.

4.3 Penentuan Jalur Kritis

Dalam penentuan jalur kritis, perhitungan dilakukan dengan mengintegrasikan *python*, dengan dilakukan validasi menggunakan *Microsoft project*. Penentuan jalur kritis akan dilakukan mulai dari awal pembangunan jembatan no. 8 dilakukan hingga pekerjaan strukturnya selesai. Daftar pekerjaan pada jembatan no. 08 dilampirkan dilampirkan pada Lampiran.

Setelah aktivitas pekerjaan sudah didapatkan, dilakukan penentuan jalur kritis melalui menggunakan *python*, dan input data yang dibutuhkan melalui *Microsoft Excel*. Potongan Sintaks yang digunakan untuk melakukan perhitungan jalur kritis disajikan di bawah ini :

```
class Task(object):
    def __init__(self, pekerjaan, aktivitas, predesesor, hari):
        self.pekerjaan = pekerjaan
        self.aktivitas = str(aktivitas).upper().strip() if pd.isna(aktivitas) else "
        self.predesesor = predesesor
        self.hari = hari if pd.isna(hari) else 0
        self.earliestStart = 0
        self.earliestFinish = 0
        self.suksesor = [] # menyimpan tuple (aktivitas_suksesor, rel_type, lag)
        self.latestStart = 0

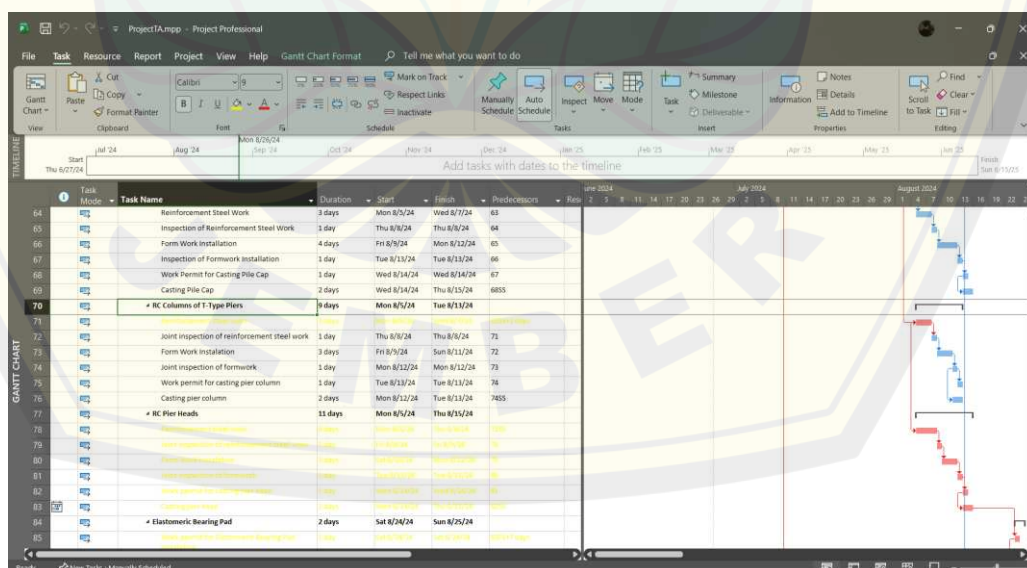
def main():
    os.system('cls') # untuk Windows
    df = readData()
    taskObject = createTask(df)
    forwardPass(taskObject)
    backwardPass(taskObject)
    slack(taskObject)
    finaldf = updateDataFrame(df, taskObject)
    print(finaldf)
    print('\nFile saved to InputPython.xlsx\n')
    finaldf.to_excel(r'C:\Users\alrafi\OneDrive\Desktop\Skrpsi\File TA\InputPython.xlsx', index=False)
```

Pada susunan sintaks yang sudah ditampilkan, menunjukkan proses penyusunan logika perhitungan jalur kritis yang akan digunakan dalam mengolah data yang diinput untuk perhitungan. Proses input data yang dibutuhkan akan dilakukan dengan menggunakan basis *Microsoft Excel*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	Pekerjaan	Aktivitas	Predecessor	Hari	ES	EF	LS	LF	SLACK	CRITICAL								
65	Reinforcement Steel Work	W2	V2-FS-0	3	39	42	330	333	291	TIDAK								
66	Inspection of Reinforcement Steel Work	X2	W2-FS-0	1	42	43	333	334	291	TIDAK								
67	Form Work Installation	Y2	X2-FS-0	4	43	47	334	338	291	TIDAK								
68	Inspection of Formwork Installation	Z2	Y2-FS-0	1	47	48	338	339	291	TIDAK								
69	Work Permit for Casting Pile Cap	A3	Z2-FS-0	1	48	49	339	340	291	TIDAK								
70	Casting Pile Cap	B3	A3-FS-0	2	48	50	339	341	291	TIDAK								
71	RC Columns of T-Type Piers																	
72	Reinforcement steel work	C3	U2-FS-2	3	39	42	39	42	0	YA								
73	Joint inspection of reinforcement steel work	D3	C3-FS-0	1	42	43	335	336	293	TIDAK								
74	Form Work Installation	E3	D3-FS-0	3	43	46	336	339	293	TIDAK								
75	Joint inspection of formwork	F3	E3-FS-0	1	46	47	339	340	293	TIDAK								
76	Work permit for casting pier column	G3	F3-FS-0	1	47	48	340	341	293	TIDAK								
77	Casting pier column	H3	F3-FS-0	2	46	48	339	341	293	TIDAK								
78	RC Pier Heads																	
79	Reinforcement steel work	I3	C3-FS-0	4	39	43	39	43	0	YA								
80	Joint inspection of reinforcement steel work	J3	I3-FS-0	1	43	44	43	44	0	YA								
81	Form Work Installation	K3	J3-FS-0	3	44	47	44	47	0	YA								
82	Joint inspection of formwork	L3	K3-FS-0	1	47	48	47	48	0	YA								
83	Work permit for casting pier head	M3	L3-FS-0	1	48	49	48	49	0	YA								
84	Casting pier head	N3	M3-FS-0	2	48	50	48	50	0	YA								
85	Elastomeric Bearing Pad																	
86	Work permit for Elastomeric Bearing Pad installation	O3	N3-FS-7	1	57	58	57	58	0	YA								
87	Installation of Elastomeric Bearing Pad	P3	O3-FS-0	2	57	59	57	59	0	YA								
88	Anchor Bar with Accessories																	
89	Work permit for Anchor Bar with Accessories	Q3	P3-FS-6	1	60	61	60	61	0	YA								

Gambar 4.2 Input Data dan Hasil Logika Perhitungan *Python*

Gambar 4.2 menunjukkan data apa saja yang dibutuhkan dalam penentuan jalur kritis. Data yang diinput merupakan data kode aktivitas, predesesor, dan juga durasi pekerjaan. Untuk data predesesor, format disesuaikan kembali, sesuai dengan format yang sudah digunakan pada *python*, yaitu : kode aktivitas : jenis predesesor : durasi pekerjaan. Pada gambar tersebut juga menunjukkan hasil dari logika perhitungan *python*. Setelah itu, akan dilakukan validasi dengan menggunakan *Software Microsoft project*.

Gambar 4.3 Validasi *Microsoft project*

Pada gambar 4.3, menunjukkan proses validasi yang dilakukan dengan menggunakan *Microsoft project*. Hasil validasi menunjukkan hasil yang sama dengan hasil logika perhitungan *python* dan hasil validasi akan dilampirkan pada lampiran. Setelah dilakukan pengecekan terhadap *output Microsoft project*, hasil logika perhitungan *Python* dapat dinyatakan valid jika hasil dari *Python* sudah sama dengan *output Microsoft project*. Tabel 4.2 melampirkan pekerjaan-pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis, termasuk dengan durasi dan volumenya, berdasarkan logika perhitungan *python* dan validasi *Microsoft project*.

Tabel 4.2 Pekerjaan Dalam Jalur Kritis

Pekerjaan	Durasi	Volume	Satuan
Substructure			
P2			
Spun Pile			
Concrete Spun Pile Driven	20	621.26	m
Structure Excavation	2	119.53	m3
Pile Cap			
Blinding Stone (T=20 cm)	1	12.78	m3
RC Columns of T-Type Piers			
Reinforcement Steel Work	3	8365.7	kg
RC Pier Heads			
Reinforcement Steel Work	4	6596.44	kg
Casting Pier Heads	5	41.52	m3
Elastomeric Bearing Pad			
Installation of Elastomeric Bearing Pad	2	20	bh
		20	bh
Anchor Bar with Accessories			
Installation of Anchor Bar with Accessories	1	818.069	kg
Superstructure			
P28-P29			
Reinforcement Steel Works	16	55317.14	kg
Casting RC Slab	18	273.836	m3
P29-A1 (Bridge No. 09)			
Reinforcement Steel Works	9	55317.14	kg
Casting RC Slab	16	273.836	m3

4.3 Penentuan Kebutuhan Tenaga Kerja

Kebutuhan tenaga kerja untuk masing-masing pekerjaan perlu dihitung untuk dapat menentukan biaya percepatan yang akan dilakukan (*crash cost*). Kebutuhan tenaga kerja akan dihitung berdasarkan pada koefisien pekerja pada dokumen AHSP, volume pekerjaan, dan durasi dari setiap pekerjaan. Berikut merupakan contoh perhitungan dari kebutuhan pekerja pada pekerjaan *Reinforcement Steel Work* yang terletak pada *P2-RC Columns of T-Type Piers* :

$$\text{Kebutuhan Tenaga Kerja} = \frac{\text{Koefisien Tenaga Kerja} \times \text{Volume}}{\text{Durasi Pekerjaan}}$$

$$\text{Kebutuhan Pekerja} = \frac{0,015 \times 8365,7}{3} = 41,83 \approx 42$$

4.4 Penerapan Metode *Time Cost Trade Off*

Penerapan metode *time cost trade off* akan menggunakan 4 metode alternatif, yaitu lembur 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, serta penambahan *shift* kerja. Proses percepatan dilakukan untuk masing-masing alternatif. Hasil perhitungan dari masing-masing alternatif kemudian dibandingkan terhadap biaya tidak langsung proyek untuk menentukan durasi dan biaya optimal yang menghasilkan biaya total proyek paling minimum. Skenario jam lembur akan menambahkan jam kerja sebanyak 1, 2, 3, dan 4 jam dari waktu kerja normal, yaitu 08.00 hingga 17.00. Sedangkan scenario *shift* kerja akan dibagi menjadi 2 *shift*, yaitu *shift* pagi pada jam 08.00 hingga 17.00, dan *shift* malam pada jam 19.00 hingga 04.00. Alternatif lembur akan dilakukan *crashing* secara keseluruhan, sedangkan alternatif *shift* kerja akan dilakukan *crashing* secara iteratif, berdasarkan *cost slope*.

4.4.1 *Crash Duration Jam Lembur*

Perhitungan *crash duration* jam lembur dilakukan dengan menentukan produktivitas per jam terlebih dahulu. Penambahan jam lembur akan menyebabkan penurunan efisiensi tenaga kerja akibat kelelahan. Penurunan efisiensi ini diperhitungkan menggunakan koefisien penurunan produktivitas lembur yang mengacu pada (Fardila & Adwayah, 2021). Berdasarkan

produktivitas per jam dan koefisien penurunan produktivitas yang diperoleh, kemudian dihitung durasi percepatan (*crash duration*) masing-masing kegiatan kritis untuk setiap alternatif jam lembur, yaitu lembur 1 jam, 2 jam, 3 jam dan, 4 jam per hari.

Berikut merupakan contoh perhitungan durasi percepatan (*crash duration*) lembur 1 jam pada pekerjaan *concrete spun pile, driven* :

1. Perhitungan Produktivitas per-Jam

Merujuk pada Rumus 2.3

$$a = \frac{621,26 \text{ m}}{20 \text{ hari} \times 8 \text{ jam}}$$

$$a = 3,88 \text{ m/jam}$$

2. Perhitungan Durasi Percepatan (*Crash Duration*)

Merujuk pada rumus 2.5

$$b = \frac{621,26 \text{ m}}{((3,88 \text{ m/jam} \times 8 \text{ jam}) + (1 \text{ jam} \times 0,9 \times 3,88 \text{ m/jam}))}$$

$$b = 17,98 \text{ hari}$$

3. Perhitungan Durasi *Crashing*

$$c = \text{Durasi Normal} - \text{Durasi Percepatan}$$

$$c = 20 \text{ hari} - 17,98 \text{ hari}$$

$$c = 2,02 \text{ hari}$$

Rekapitulasi perhitungan durasi percepatan (*crash duration*) lembur dari setiap pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis dilampirkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Rekapitulasi *Crash Duration* Jam Lembur

Pekerjaan	Durasi Normal	Durasi Setelah Crashing			
		Lembur 1 Jam	Lembur 2 Jam	Lembur 3 Jam	Lembur 4 Jam
Substructure					
P2					
Spun Pile					
Concrete Spun Pile Driven	20	17.98	16.67	15.84	15.38
Structure Excavation	2	1.80	1.67	1.58	1.54
Pile Cap					

Blinding Stone (T=20 cm)	1	0.90	0.83	0.79	0.77
RC Columns of T-Type Piers					
Reinforcement Steel Work	3	2.70	2.50	2.38	2.31
RC Pier Heads					
Reinforcement Steel Work	4	3.60	3.33	3.17	3.08
Casting Pier Heads	5	4.49	4.17	3.96	3.85
Elastomeric Bearing Pad					
Installation of Elastomeric Bearing Pad	2	1.80	1.67	1.58	1.54
Anchor Bar with Accessories					
Installation of Anchor Bar with Accessories	1	0.90	0.83	0.79	0.77
Superstructure					
P28-P29					
Reinforcement Steel Works	16	14.38	13.33	12.67	12.31
Casting RC Slab	18	16.18	15.00	14.26	13.85
P29-A1 (Bridge No. 09)					
Reinforcement Steel Works	9	8.09	7.50	7.13	6.92
Casting RC Slab	16	14.38	13.33	12.67	12.31
Total	97	87.19	80.83	76.83	74.62

4.4.2 Crash Duration Shift Kerja

Perhitungan *crash duration* dengan metode *shift* kerja dilakukan dengan membagi waktu pelaksanaan pekerjaan menjadi 2 *shift* per hari, yaitu *shift* pagi dan *shift* malam, dengan masing-masing *shift* memiliki durasi 8 jam kerja efektif. Penambahan *shift* kerja memungkinkan pekerjaan berlangsung selama 16 jam per hari, sehingga produktivitas harian meningkat dibandingkan kondisi normal. Tetapi produktivitas tidak akan meningkat 2 kali lipat, karena terdapat pengurangan produktivitas sebesar 11% (Rabbani & Supriyadi, 2022). Berdasarkan peningkatan produktivitas tersebut, kemudian dihitung *crash duration* masing-masing kegiatan kritis yang berada pada jalur kritis proyek.

Berikut merupakan contoh perhitungan durasi percepatan (*crash duration*) *shift* kerja pada pekerjaan *concrete spun pile, driven* :

1. Perhitungan Produktivitas Harian

Merujuk pada Rumus 2.2

$$a = \frac{621,6 \text{ m}}{20 \text{ hari}}$$

$$a = 31,06 \text{ m/hari}$$

2. Perhitungan Produktivitas *Shift* Kerja

Merujuk pada Rumus 2.10

$$b = 31,06 + (31,06 - (31,06 \times 11\%))$$

$$b = 58,71 \text{ m/hari}$$

3. Perhitungan Durasi Percepatan (*Crash Duration*)

Merujuk pada Rumus 2.11

$$c = \frac{621,6 \text{ m}}{58,71 \text{ m/hari}}$$

$$c = 10,58 \text{ hari}$$

4. Perhitungan Durasi *Crashing*

$$d = \text{Durasi Normal} - \text{Durasi Percepatan}$$

$$d = 20 \text{ hari} - 10,58 \text{ hari}$$

$$d = 9,42 \text{ hari}$$

Rekapitulasi perhitungan durasi percepatan (*crash duration*) *shift* kerja dari setiap pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis dilampirkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Rekapitulasi *Crash Duration Shift* Kerja

Pekerjaan	Durasi Normal	Durasi Setelah Crashing
		Shift Kerja
Substructure		
P2		
Spun Pile		
Concrete Spun Pile Driven	20	10.58
Structure Excavation	2	1.06
Pile Cap		
Blinding Stone (T=20 cm)	1	0.53
RC Columns of T-Type Piers		
Reinforcement Steel Work	3	1.59
RC Pier Heads		
Reinforcement Steel Work	4	2.12
Casting Pier Heads	5	2.65
Elastomeric Bearing Pad		
Installation of Elastomeric Bearing Pad	2	1.06
Anchor Bar with Accessories		
Installation of Anchor Bar with Accessories	1	0.53

Superstructure		
P28-P29		
Reinforcement Steel Works	16	8.47
Casting RC Slab	18	9.52
P29-A1 (Bridge No. 09)		
Reinforcement Steel Works	9	4.76
Casting RC Slab	16	8.47
Total	97	51.32

4.4.3 Crash Cost Jam Lembur

Setelah diperoleh nilai *crash duration* pada masing-masing alternatif jam lembur, selanjutnya dilakukan perhitungan *crash cost* atau biaya percepatan akibat penambahan jam lembur. *Crash cost* jam lembur dihitung berdasarkan penambahan upah tenaga kerja yang timbul akibat jam kerja melebihi waktu normal. Perhitungan upah lembur mengacu pada (Rajagukguk et al., 2026), di mana upah lembur jam pertama sebesar 1,5 kali upah per jam normal, sedangkan jam lembur berikutnya sebesar 2 kali upah per jam normal. Biaya langsung total pada kondisi lembur kemudian diperoleh dengan menjumlahkan biaya normal pekerjaan dengan tambahan biaya upah lembur tenaga kerja pada masing-masing alternatif, yaitu lembur 1 jam, 2 jam, dan 3 jam per hari.

Berikut merupakan contoh perhitungan biaya percepatan (*crash cost*) lembur pada pekerjaan *Reinforcement Steel Work* yang berlokasi pada *RC Columns of T-Type Piers* :

- Lembur 1 Jam

1. Perhitungan Upah per Jam

$$Pekerja = \frac{Rp\ 152.400}{8\ Jam} = Rp\ 19.050$$

$$Tukang = \frac{Rp\ 152.400}{8\ Jam} = Rp\ 19.050$$

$$Mandor = \frac{Rp\ 178.300}{8\ Jam} = Rp\ 22.287$$

2. Perhitungan Upah Lembur 1 Jam

Merujuk pada Rumus 2.6

$$Pekerja = 1,5 \times Rp\ 19.050 = Rp\ 28.575$$

$$Tukang = 1,5 \times Rp\ 19.050 = Rp\ 28.575$$

$$Mandor = 1,5 \times Rp\ 22.287 = Rp\ 33.431$$

3. Perhitungan Total Upah Lembur 1 Jam

Merujuk pada Rumus 2.8

$$Pekerja = 42 \times Rp\ 28.575 \times 2,7\ hari = Rp\ 3.236.359$$

$$Tukang = 14 \times Rp\ 28.575 \times 2,7\ hari = Rp\ 1.078.786$$

$$Mandor = 14 \times Rp\ 33.431 \times 2,7\ hari = Rp\ 1.262.123$$

$$Total = 3.236.359 + 1.078.786 + 1.262.123$$

$$= Rp\ 5.577.269$$

4. Perhitungan Biaya Percepatan (*Crash Cost*)

Merujuk pada Rumus 2.9

$$d = \text{Biaya Normal} + c$$

$$d = Rp\ 122.239.608 + Rp\ 5.557.269$$

$$d = Rp\ 127.816.878$$

Rekapitulasi perhitungan biaya percepatan (*crash cost*) lembur dari setiap pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis dilampirkan pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4.5 Rekapitulasi *Crash Cost* Jam Lembur 1 Jam dan 2 Jam

Pekerjaan	Biaya Normal		Biaya Setelah Crashing			
			Lembur 1 Jam		Lembur 2 Jam	
Substructure						
P2						
Spun Pile						
Concrete Spun Pile Driven	Rp	85,615,840.60	Rp	87,830,784.42	Rp	90,407,194.77
Structure Excavation	Rp	5,586,234.55	Rp	5,697,706.46	Rp	5,827,369.97
Pile Cap						
Blinding Stone (T=20 cm)	Rp	3,602,682.00	Rp	4,121,277.51	Rp	4,724,504.92
RC Columns of T-Type Piers						
Reinforcement Steel Work	Rp	122,239,608.40	Rp	127,969,776.94	Rp	134,635,077.15
RC Pier Heads						

Reinforcement Steel Work	Rp	96,387,181.28	Rp	101,096,481.84	Rp	106,567,368.78
Casting Pier Heads	Rp	218,016,288.48	Rp	218,980,839.04	Rp	220,102,798.90
Elastomeric Bearing Pad						
Installation of Elastomeric Bearing Pad	Rp	35,300,980.00	Rp	35,846,710.34	Rp	36,481,500.83
Anchor Bar with Accessories						
Installation of Anchor Bar with Accessories	Rp	20,240,663.20	Rp	22,171,146.34	Rp	24,416,673.61
Superstructure						
P28-P29						
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	846,764,701.37	Rp	891,513,549.68
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	532,777,595.09	Rp	539,044,024.16
P29-A1 (Bridge No. 09)						
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	846,358,740.69	Rp	890,635,377.81
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	532,179,010.82	Rp	537,749,169.99
Total	Rp	3,258,358,251.19	Rp	3,361,794,770.85	Rp	3,482,104,610.56

Tabel 4.6 Rekapitulasi Crash Cost Jam Lembur 3 Jam dan 4 Jam

Pekerjaan	Biaya Normal	Biaya Setelah Crashing				
		Lembur 3 Jam		Lembur 4 Jam		
Substructure						
P2						
Spun Pile						
Concrete Spun Pile Driven	Rp	85,615,840.60	Rp	92,772,375.25	Rp	95,093,244.45
Structure Excavation	Rp	5,586,234.55	Rp	5,946,402.87	Rp	6,063,205.70
Pile Cap						
Blanding Stone (T=20 cm)	Rp	3,602,682.00	Rp	5,278,276.06	Rp	5,821,672.38
RC Columns of T-Type Piers						
Reinforcement Steel Work	Rp	122,239,608.40	Rp	140,753,915.33	Rp	146,758,118.02
RC Pier Heads						
Reinforcement Steel Work	Rp	96,387,181.28	Rp	111,592,666.43	Rp	116,523,815.90

Casting Pier Heads	Rp	218,016,288.48	Rp	221,132,773.63	Rp	222,143,451.94
Elastomeric Bearing Pad						
Installation of Elastomeric Bearing Pad	Rp	35,300,980.00	Rp	37,064,247.33	Rp	37,636,076.15
Anchor Bar with Accessories						
Installation of Anchor Bar with Accessories	Rp	20,240,663.20	Rp	26,478,098.84	Rp	28,500,903.58
Superstructure						
P28-P29						
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	932,593,614.04	Rp	972,904,049.68
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	544,796,693.10	Rp	550,441,586.66
P29-A1 (Bridge No. 09)						
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	931,281,945.72	Rp	971,167,006.41
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	542,862,653.49	Rp	547,880,336.66
Total	Rp	3,258,358,251.19	Rp	3,592,553,662.08	Rp	3,700,933,467.53

4.4.4 Crash Cost Shift Kerja

Perhitungan *crash cost* pada metode *shift* kerja dilakukan untuk mengetahui besarnya penambahan biaya langsung akibat penerapan sistem kerja 2 *shift* per hari. Penambahan biaya pada metode *shift* kerja berasal dari penambahan jumlah tenaga kerja yang dipekerjakan pada *shift* kedua untuk menggantikan tenaga kerja *shift* pertama. Upah tenaga kerja *shift* kedua diperhitungkan dengan adanya penambahan 15% dari upah tenaga kerja normal per hari (Rabbani & Supriyadi, 2022). Biaya langsung total pada kondisi *shift* kerja kemudian diperoleh dengan menjumlahkan biaya tenaga kerja *shift* pertama dan biaya tenaga kerja *shift* kedua pada setiap kegiatan kritis yang dilakukan percepatan.

Berikut merupakan contoh perhitungan biaya percepatan (*crash cost*) lembur 1 jam pada pekerjaan *Reinforcement Steel Work* yang berlokasi pada *RC Columns of T-Type Piers* :

1. Perhitungan Upah per Shift Malam

Merujuk pada Rumus 2.12

$$Pekerja = Rp\ 152.400 + (15\% \times Rp\ 152.400) = Rp\ 175.260$$

$$Tukang = Rp\ 152.400 + (15\% \times Rp\ 152.400) = Rp\ 175.260$$

$$Mandor = Rp\ 178.300 + (15\% \times Rp\ 178.300) = Rp\ 205.045$$

2. Perhitungan Upah Shift Kerja Pagi

Merujuk pada Rumus 2.13

$$Pekerja = 42 \times Rp\ 152.400 = Rp\ 6.400.800$$

$$Tukang = 14 \times Rp\ 152.400 = Rp\ 2.133.600$$

$$Mandor = 14 \times Rp\ 178.300 = Rp\ 2.496.200$$

$$Total = Rp\ 6.400.800 + Rp\ 2.133.600 + Rp\ 2.496.200 = Rp\ 11.030.600$$

3. Perhitungan Upah Shift Kerja Malam

Merujuk pada Rumus 2.13

$$Pekerja = 42 \times Rp\ 175.260 = Rp\ 7.360.920$$

$$Tukang = 14 \times Rp\ 175.260 = Rp\ 2.453.640$$

$$Mandor = 14 \times Rp\ 205.045 = Rp\ 2.870.630$$

$$Total = Rp\ 7.360.920 + Rp\ 2.453.640 + Rp\ 2.870.630 = Rp\ 12.685.190$$

4. Perhitungan Biaya Percepatan (*Crash Cost*)

Merujuk pada Rumus 2.14

$$c = \text{Biaya Normal} + (\text{Durasi Percepatan} \times (a + b))$$

$$c = Rp\ 122.239.608 + (1.59 \text{ hari} \times (Rp\ 11.030.600 + Rp\ 12.685.190))$$

$$c = Rp\ 159.883.719$$

Rekapitulasi perhitungan biaya percepatan (*crash cost*) shift kerja dari setiap pekerjaan yang termasuk dalam jalur kritis terlampir pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Rekapitulasi *Crash Cost* Shift Kerja

Pekerjaan	Biaya Normal		Biaya Setelah Crashing	
			Shift Kerja	
Substructure				
P2				
Spun Pile				
Concrete Spun Pile Driven	Rp	85,615,840.60	Rp	100,565,734.78
Structure Excavation	Rp	5,586,234.55	Rp	6,338,620.79
Pile Cap				

Blinding Stone (T=20 cm)	Rp	3,602,682.00	Rp	7,102,973.01
RC Columns of T-Type Piers				
Reinforcement Steel Work	Rp	122,239,608.40	Rp	160,915,719.51
RC Pier Heads				
Reinforcement Steel Work	Rp	96,387,181.28	Rp	128,151,213.03
Casting Pier Heads	Rp	218,016,288.48	Rp	224,526,579.49
Elastomeric Bearing Pad				
Installation of Elastomeric Bearing Pad	Rp	35,300,980.00	Rp	38,984,419.15
Anchor Bar with Accessories				
Installation of Anchor Bar with Accessories	Rp	20,240,663.20	Rp	33,270,573.25
Superstructure				
P28-P29				
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	1,067,953,986.19
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	563,751,955.71
P29-A1 (Bridge No. 09)				
Reinforcement Steel Works	Rp	808,294,049.68	Rp	1,065,213,930.63
Casting RC Slab	Rp	527,390,336.66	Rp	559,711,775.81
Total	Rp	3,258,358,251.19	Rp	3,956,487,481.35

4.4.5 Perhitungan *Cost Slope*

Setelah diperoleh nilai *crash cost* dan *crash duration* pada masing-masing alternatif percepatan, selanjutnya dilakukan perhitungan *cost slope* untuk setiap kegiatan kritis. *Cost slope* merupakan besarnya pertambahan biaya langsung per satuan waktu percepatan yang diperlukan untuk mempercepat durasi suatu kegiatan sebesar satu hari. Pada perhitungan *cost slope*, pengintegrasian dengan *python* akan dilakukan kembali.

```
import openpyxl
from openpyxl.styles import Font, PatternFill, Alignment, Border, Side
from openpyxl.utils import get_column_letter

INPUT_FILE = r"C:\Users\alrafi\OneDrive\Desktop\Skrripsi\File TA\InputCostSlope.xlsx"

COL_BIAYA_PERCEPATAN = {
    "Lembur 1 Jam": 2, # Kolom B
    "Lembur 2 Jam": 3, # Kolom C
    "Lembur 3 Jam": 4, # Kolom D
    "Shift Kerja": 5, # Kolom E
}

COL_BIAYA_NORMAL = 6 # Kolom F
COL_DURASI_NORMAL = 7 # Kolom G
COL_DURASI_CRASH = {
    "Lembur 1 Jam": 8, # Kolom H
    "Lembur 2 Jam": 9, # Kolom I
    "Lembur 3 Jam": 10, # Kolom J
    "Shift Kerja": 11, # Kolom K
}
```

```

print(f"\n{'=' * 65}")
print(f" Selesai! {jumlah_item} item pekerjaan dihitung.")
print(f" Cost Slope tersimpan di:")
print(f" Kolom L → Lembur 1 Jam")
print(f" Kolom M → Lembur 2 Jam")
print(f" Kolom N → Lembur 3 Jam")
print(f" Kolom O → Shift Kerja")
print(f" File disimpan: {INPUT_FILE}")
print(f"{'=' * 65}")

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Sintaks diatas menunjukkan merupakan proses penyusunan logika perhitungan yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *cost slope* dari setiap alternatif yang selengkapanya akan dilampirkan pada Lampiran. Berikut merupakan contoh perhitungan *cost slope* alternatif lembur 1 jam pada pekerjaan *Concrete Spun Pile, Driven*, mengacu pada Rumus 2.15 :

$$a = \frac{Rp\ 87.757.975 - Rp\ 85.615.840}{20\ hari - 17.98\ hari}$$

$$a = Rp\ 1.059.16\ /hari$$

Rekapitulasi perhitungan *cost slope* yang didapatkan dari hasil perhitungan *python* untuk seluruh pekerjaan dan alternatif percepatan terlampir pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Rekapitulasi Perhitungan *Cost Slope* Lembur 1 Jam, 2 Jam dan 3 Jam

Pekerjaan	Cost Slope					
	Lembur 1 Jam		Lembur 2 Jam		Lembur 3 Jam	
Substructure						
P2						
Spun Pile						
Concrete Spun Pile Driven	Rp	1,095,166.67	Rp	1,437,406.25	Rp	1,720,976.19
Structure Excavation	Rp	551,166.67	Rp	723,406.25	Rp	866,119.05
Pile Cap						
Blanding Stone (T=20 cm)	Rp	5,128,333.33	Rp	6,730,937.50	Rp	8,058,809.52
RC Columns of T-Type Piers						
Reinforcement Steel Work	Rp	18,888,333.33	Rp	24,790,937.50	Rp	29,681,666.67
RC Pier Heads						

Reinforcement Steel Work	Rp	11,773,251.40	Rp	15,270,281.25	Rp	18,282,785.71
Casting Pier Heads	Rp	1,907,666.67	Rp	2,503,812.50	Rp	2,997,761.90
Elastomeric Bearing Pad						
Installation of Elastomeric Bearing Pad	Rp	2,698,333.33	Rp	3,541,562.50	Rp	4,240,238.10
Anchor Bar with Accessories						
Installation of Anchor Bar with Accessories	Rp	19,090,333.33	Rp	25,056,062.50	Rp	29,999,095.24
Superstructure						
P28-P29						
Reinforcement Steel Works	Rp	23,777,000.00	Rp	31,207,312.50	Rp	37,363,857.14
Casting RC Slab	Rp	2,959,666.67	Rp	3,884,562.50	Rp	4,650,904.76
P29-A1 (Bridge No. 09)						
Reinforcement Steel Works	Rp	41,824,166.67	Rp	54,894,218.75	Rp	65,723,690.48
Casting RC Slab	Rp	2,959,666.67	Rp	3,884,562.50	Rp	4,650,904.76
Total	Rp	132,653,084.74	Rp	173,925,062.50	Rp	208,236,809.52

Tabel 4.9 Rekapitulasi Perhitungan *Cost Slope* 4 Jam dan Shift Kerja

Pekerjaan	Cost Slope	
	Lembur 4 Jam	Shift Kerja
Substructure		
P2		
Spun Pile		
Concrete Spun Pile Driven	Rp 2,053,437.50	Rp 1,587,376.40
Structure Excavation	Rp 1,033,437.50	Rp 798,882.02
Pile Cap		
Blanding Stone (T=20 cm)	Rp 9,615,625.00	Rp 7,433,202.25
RC Columns of T-Type Piers		
Reinforcement Steel Work	Rp 35,415,625.00	Rp 27,377,471.91
RC Pier Heads		
Reinforcement Steel Work	Rp 21,814,687.50	Rp 16,863,488.76
Casting Pier Heads	Rp 3,576,875.00	Rp 2,765,044.94
Elastomeric Bearing Pad		
Installation of Elastomeric Bearing Pad	Rp 5,059,375.00	Rp 3,911,067.42
Anchor Bar with Accessories		
Installation of Anchor Bar with Accessories	Rp 35,794,375.00	Rp 27,670,258.43

Superstructure				
P28-P29				
Reinforcement Steel Works	Rp	44,581,875.00	Rp	34,463,292.13
Casting RC Slab	Rp	5,549,375.00	Rp	4,289,853.93
P29-A1 (Bridge No. 09)				
Reinforcement Steel Works	Rp	78,420,312.50	Rp	60,621,544.94
Casting RC Slab	Rp	5,549,375.00	Rp	4,289,853.93
Total	Rp	248,464,375.00	Rp	192,071,337.08

4.5 Biaya Langsung dan Tidak Langsung

Analisis biaya dalam metode *Time Cost Trade Off* melibatkan dua komponen biaya utama, yaitu biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*). Hubungan antara kedua komponen biaya tersebut kemudian dianalisis untuk setiap skenario percepatan guna memperoleh gambaran perubahan biaya total proyek akibat penerapan metode *crashing*.

Pada proyek pembangunan jembatan no. 08, diketahui biaya total untuk keseluruhan pekerjaan struktur sebesar Rp 88,386,871,932.42. Berdasarkan PERMEN-PUPR No. 8 Tahun 2023 Pasal 11 Ayat 3, biaya tidak langsung dihitung sebesar 11% hingga 15% dari biaya tidak langsung. Berdasarkan peraturan tersebut, pada studi kasus ini, digunakan nilai tengah sebesar 13%. Sehingga didapatkan nilai biaya langsung sebesar Rp 78.218.470.736,65 dan biaya tidak langsung sebesar Rp 10.168.401.195,77. Untuk masing masing alternatif, biaya langsung akan ditambahkan dengan selisih biaya dari kondisi normal, dan biaya tidak langsung akan dihitung menggunakan rumus 2.1.

Berikut merupakan contoh perhitungan biaya tidak langsung dari alternatif percepatan lembur 1 jam, yang merujuk pada Rumus 2.1

$$a = \frac{11.245.663.921,16}{341} \times 331,2$$

$$a = \text{Rp } 9.875.903.444,80$$

4.5.1 Perhitungan Biaya Tambahan

Pada alternatif percepatan shift kerja, diperlukan perhitungan biaya tambahan yang dibutuhkan untuk menunjang pelaksanaan proyek pada malam

hari. Item yang akan diperhitungkan meliputi kebutuhan penerangan dan juga keamanan proyek. Pada Tabel 4.10 dilampirkan rekapitulasi dari biaya tambahan per hari untuk dilakukan percepatan.

Tabel 4.10 Rekapitulasi Biaya Tambahan

Uraian	Satuan	Volume	Harga Satuan	Harga Total
Lampu Sorot	Unit	4	Rp 245,000.00	Rp 980,000.00
Listrik (PLN)	kWh	4,8	Rp 1,400.70	Rp 6,934.56
Keamanan	Orang	2	Rp 150,000.00	Rp 300,000.00
Total				Rp 1,286,934.56

4.5.2 Rekapitulasi Biaya Langsung dan Tidak Langsung

Rekapitulasi biaya langsung dan biaya tidak langsung dari setiap alternatif percepatan disajikan pada Tabel 4.11 dan Tabel 4.12, sebagai berikut :

Tabel 4.11 Rekapitulasi Biaya Langsung dan Biaya Tidak Langsung Alternatif Lembur

Kondisi Normal	
Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Rp 78,218,470,736.65	Rp 10,168,401,195.77
Lembur 1 Jam	
Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Rp 78,321,907,256.32	Rp 9,875,903,444.80
Lembur 2 Jam	
Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Rp 78,442,217,096.03	Rp 9,686,321,569.18
Lembur 3 Jam	
Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Rp 78,552,666,147.55	Rp 9,566,994,928.94
Lembur 4 Jam	
Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Rp 78,661,045,953.00	Rp 9,500,906,328.19

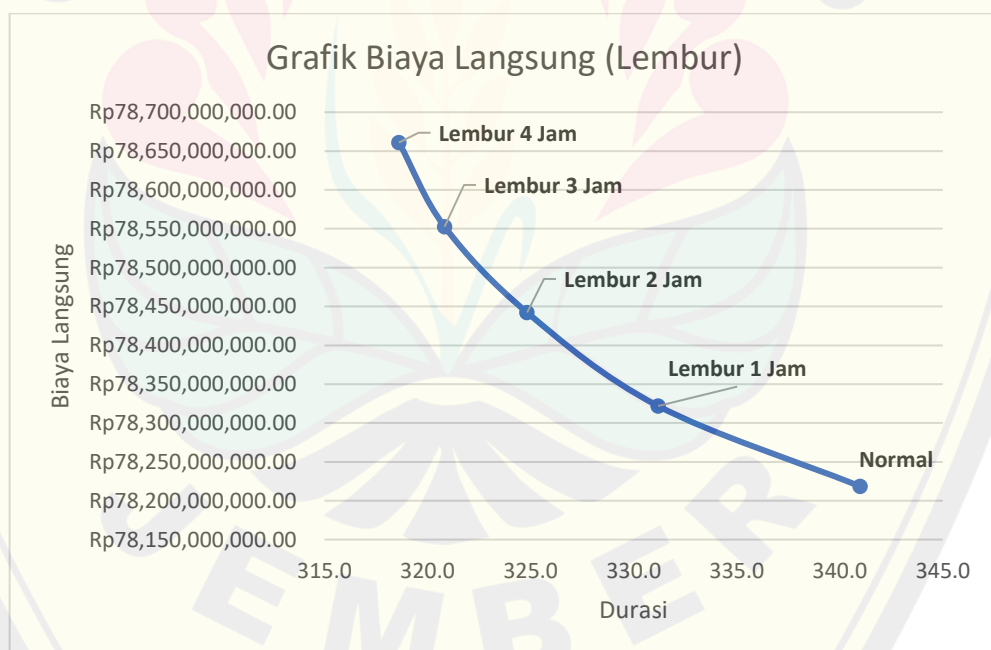
Tabel 4.12 Rekapitulasi Biaya Langsung dan Biaya Tidak Langsung Alternatif *Shift* Kerja

Skenario	Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung
Normal	Rp 78,218,470,736.65	Rp 10,168,401,195.77

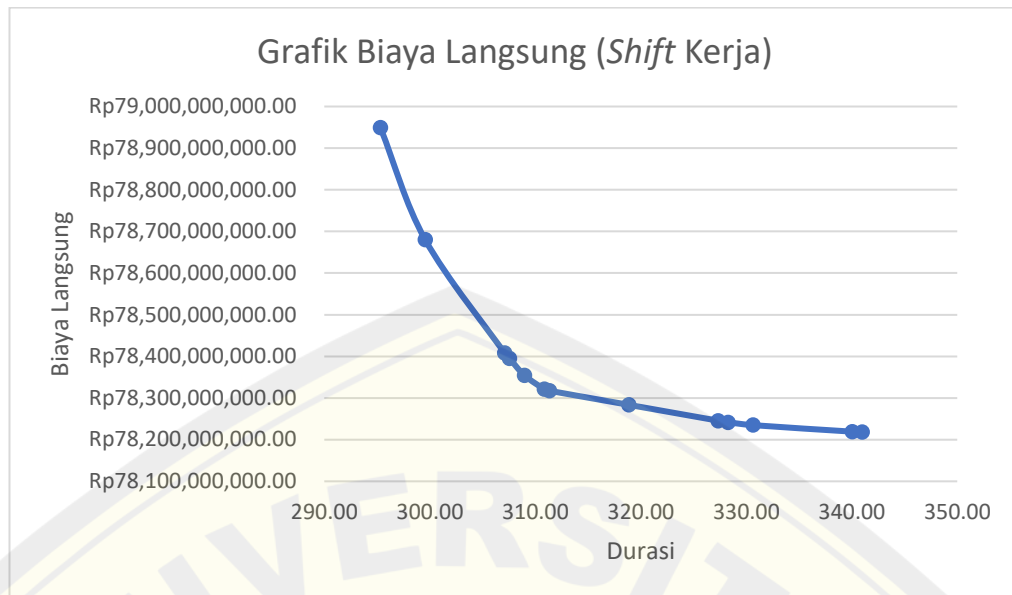
Iterasi 1	Rp	78,219,258,117.61	Rp	10,140,317,355.63
Iterasi 2	Rp	78,234,903,355.70	Rp	9,859,478,954.28
Iterasi 3	Rp	78,241,716,450.94	Rp	9,789,269,353.95
Iterasi 4	Rp	78,245,571,212.85	Rp	9,761,185,513.81
Iterasi 5	Rp	78,283,624,069.99	Rp	9,508,430,952.60
Iterasi 6	Rp	78,317,448,831.89	Rp	9,283,760,231.52
Iterasi 7	Rp	78,321,111,927.13	Rp	9,269,718,311.45
Iterasi 8	Rp	78,354,353,355.70	Rp	9,213,550,631.18
Iterasi 9	Rp	78,394,828,355.70	Rp	9,171,424,870.98
Iterasi 10	Rp	78,408,464,308.08	Rp	9,157,382,950.91
Iterasi 11	Rp	78,680,201,450.94	Rp	8,932,712,229.83
Iterasi 12	Rp	78,949,071,093.80	Rp	8,806,334,949.23

4.6 Hubungan Biaya dan Waktu

Setelah setiap komponen biaya dan durasi dari setiap alternatif percepatan sudah ditemukan, grafik hubungan biaya dan waktu diperlukan untuk melihat perubahan biaya dan durasi, yang nantinya akan digunakan untuk menentukan biaya dan durasi paling optimal.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Biaya Langsung dan Durasi Alternatif Lembur

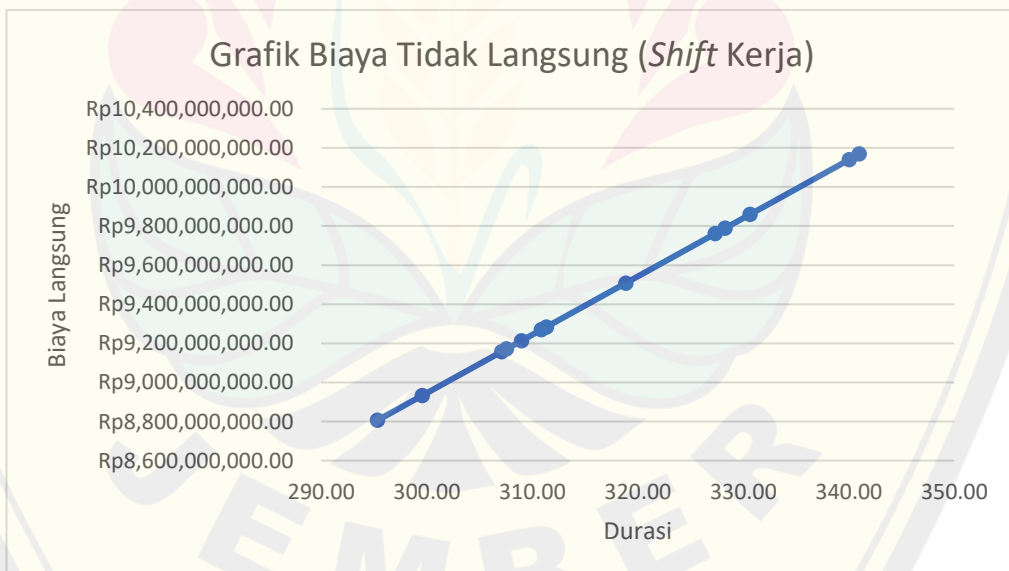


Gambar 4.5 Grafik Hubungan Biaya Langsung dan Durasi Alternatif *Shift* Kerja

Pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, dari grafik yang tertera, diketahui bahwa terdapat peningkatan biaya langsung ketika dilakukan percepatan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan adanya penambahan biaya upah para tenaga kerja ketika dilakukan alternatif percepatan lembur dan juga *shift* kerja.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Biaya Tidak Langsung dan Durasi Alternatif Lembur



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Biaya Tidak Langsung dan Durasi Alternatif Shift Kerja

Pada grafik yang tertera pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7, diketahui bahwa terdapat penurunan biaya tidak langsung ketika dilakukan percepatan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan, semakin cepat proyek selesai, maka biaya

utilitas pendukung proyek yang dikeluarkan akan semakin sedikit atau menurun. Pada Tabel 4.13, 4.14, dan 4.15 merupakan rekapitulasi dari biaya langsung, biaya tidak langsung, biaya total, dan durasi dari masing-masing alternatif percepatan :

Tabel 4.13 Rekapitulasi Biaya dan Durasi Lembur 1 Jam dan 2 Jam

		Normal		Lembur 1 Jam		Lembur 2 Jam
Biaya Langsung	Rp	78,218,470,736.65	Rp	78,321,907,256.32	Rp	78,442,217,096.03
Biaya Tidak Langsung	Rp	10,168,401,195.77	Rp	9,875,903,444.80	Rp	9,686,321,569.18
Total Biaya	Rp	88,386,871,932.42	Rp	88,197,810,701.12	Rp	88,128,538,665.21
Durasi		341		331.19		324.83

Tabel 4.14 Rekapitulasi Biaya dan Durasi Lembur 3 Jam dan 4 Jam

		Normal		Lembur 3 Jam		Lembur 4 Jam
Biaya Langsung	Rp	78,218,470,736.65	Rp	78,552,666,147.55	Rp	78,661,045,953.00
Biaya Tidak Langsung	Rp	10,168,401,195.77	Rp	9,566,994,928.94	Rp	9,500,906,328.19
Total Biaya	Rp	88,386,871,932.42	Rp	88,119,661,076.48	Rp	88,161,952,281.19
Durasi		341		320.83		318.62

Tabel 4.15 Rekapitulasi Biaya dan Durasi *Shift* Kerja

Iterasi	Durasi	Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung	Biaya Tambahan	Biaya Total
Normal	341	Rp 78,218,470,736.65	Rp 10,168,401,195.77	-	Rp 88,386,871,932.42
Iterasi 1	340.06	Rp 78,219,258,117.61	Rp 10,140,317,355.63	Rp 1,361,835.51	Rp 88,360,937,308.75
Iterasi 2	330.64	Rp 78,234,903,355.70	Rp 9,859,478,954.28	Rp 13,618,355.13	Rp 88,108,000,665.12
Iterasi 3	328.29	Rp 78,241,716,450.94	Rp 9,789,269,353.95	Rp 3,404,588.78	Rp 88,034,390,393.67
Iterasi 4	327.34	Rp 78,245,571,212.85	Rp 9,761,185,513.81	Rp 1,361,835.51	Rp 88,008,118,562.17
Iterasi 5	318.87	Rp 78,283,624,069.99	Rp 9,508,430,952.60	Rp 12,256,519.62	Rp 87,804,311,542.21
Iterasi 6	311.33	Rp 78,317,448,831.89	Rp 9,283,760,231.52	Rp 10,894,684.11	Rp 87,612,103,747.52
Iterasi 7	310.86	Rp 78,321,111,927.13	Rp 9,269,718,311.45	Rp 680,917.76	Rp 87,591,511,156.34
Iterasi 8	308.98	Rp 78,354,353,355.70	Rp 9,213,550,631.18	Rp 2,723,671.03	Rp 87,570,627,657.91

Iterasi 9	307.57	Rp 78,394,828,355.70	Rp 9,171,424,870.98	Rp 2,042,753.27	Rp 87,568,295,979.95
Iterasi 10	307.10	Rp 78,408,464,308.08	Rp 9,157,382,950.91	Rp 680,917.76	Rp 87,566,528,176.75
Iterasi 11	299.56	Rp 78,680,201,450.94	Rp 8,932,712,229.83	Rp 10,894,684.11	Rp 87,623,808,364.88
Iterasi 12	295.32	Rp 78,949,071,093.80	Rp 8,806,334,949.23	Rp 6,128,259.81	Rp 87,761,534,302.84

4.7 Penentuan Durasi dan Biaya Optimum

Berdasarkan rekapitulasi sebelumnya, akan dibuat grafik hubungan seluruh biaya dan juga durasi. Biaya total paling minimum akan dipilih sebagai alternatif percepatan paling optimal. *Python* akan digunakan dalam pembuatan grafik dan pemilihan opsi alternatif paling optimal akan ditentukan secara manual. Sintaks yang digunakan dalam pembuatan grafik untuk penentuan durasi dan biaya optimum terlampir sebagai berikut :

```
import matplotlib.pyplot as plt

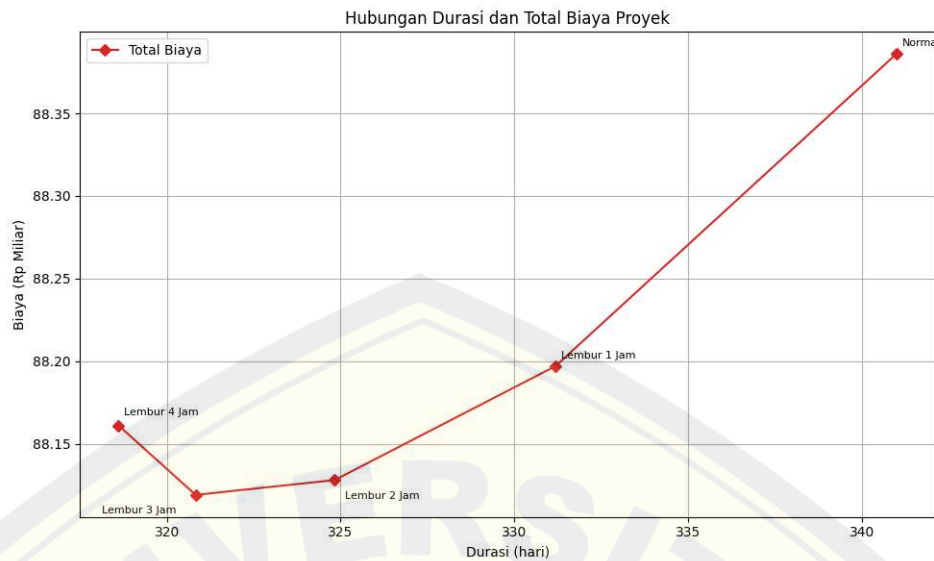
durasi = [341, 331.191, 324.833, 320.832, 318.615, 295.323]
total_biaya = [97.751, 97.531, 97.441, 97.420, 97.455, 96.943] # dalam Rp Miliar
skenario = ["Normal", "Lembur 1 Jam", "Lembur 2 Jam", "Lembur 3 Jam", "Lembur 4 Jam", "Shift Kerja"]

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(durasi, total_biaya, marker="D", color="tab:red", label="Total Biaya")

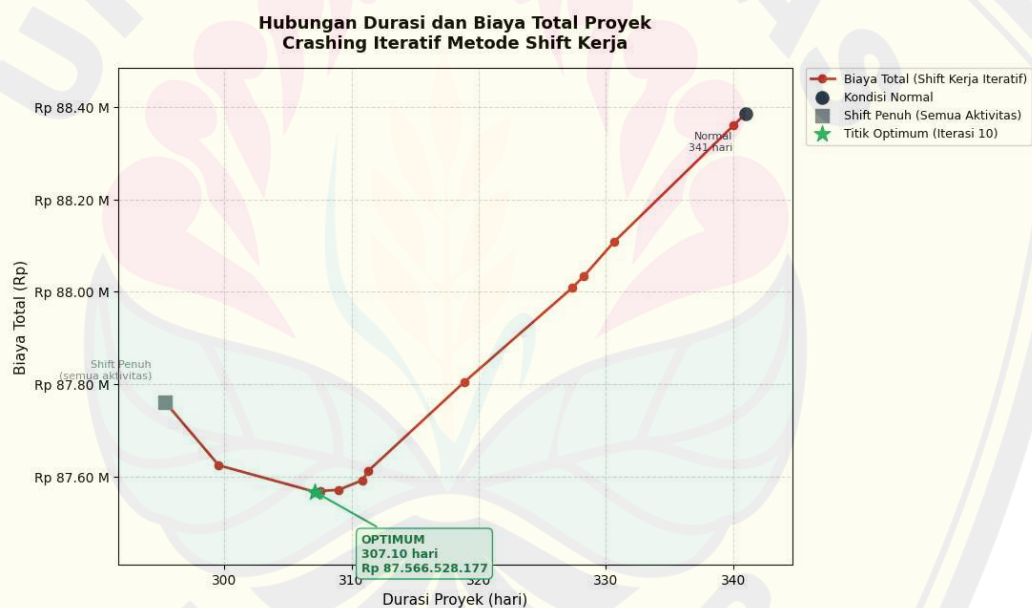
offsets = {
    "Normal": (4, 6),
    "Lembur 1 Jam": (4, 6),
    "Lembur 2 Jam": (8, -14),
    "Lembur 3 Jam": (-70, -14),
    "Lembur 4 Jam": (4, 8),
    "Shift Kerja": (4, 6),
}

for i in range(len(durasi)):
    plt.annotate(skenario[i], (durasi[i], total_biaya[i]), textcoords="offset points",
                xytext=offsets[skenario[i]], fontsize=8)

plt.title("Hubungan Durasi dan Total Biaya Proyek")
plt.xlabel("Durasi (hari)")
plt.ylabel("Biaya (Rp Miliar)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.savefig("grafik_durasi_biaya.png")
plt.show()
```



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Waktu dan Biaya Skenario Lembur



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Waktu dan Biaya Skenario Lembur

Pada Gambar 4.8, ditunjukkan bahwa pada alternatif lembur mengalami penurunan biaya total mulai dari penambahan lembur 1 jam hingga 3 jam, tetapi pada alternatif lembur 4 jam mengalami kenaikan, hal tersebut dikarenakan penurunan biaya tidak langsung sudah maksimal dan tidak dapat menutup kenaikan biaya langsung. Pada Gambar 4.9, alternatif percepatan berupa *shift* kerja menghasilkan biaya total paling kecil pada iterasi ke-10, meskipun

mengalami kenaikan biaya langsung, tetapi biaya tidak langsung mengalami penurunan secara signifikan, dikarenakan durasi proyek yang semakin pendek. Oleh karena itu, pada alternatif lembur, skenario lembur 3 jam menjadi alternatif yang paling optimal, dengan durasi 320,83 hari dan biaya sebesar Rp 88,119,661,076.48. Sedangkan pada alternatif *shift* kerja, scenario iterasi ke-10 menjadi alternatif yang paling optimal, dengan durasi 307,10 hari dan biaya sebesar Rp 87,566,528,176.75.



BAB 5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis optimasi waktu dan biaya yang sudah dilakukan pada pembangunan jembatan no. 08, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan analisis yang dilakukan dengan menggunakan integrasi *python* dan validasi *Microsoft project*, ditemukan aktivitas yang termasuk dalam jalur kritis antara lain adalah *Concrete Spun Pile Driven* dan *Structure Excavation* pada pekerjaan *Spun Pile P2*, *Blinding Stone* pada pekerjaan *Pile Cap P2*, *Reinforcement Steel Work* pada *RC Columns of T-Type Piers* dan *RC Pier Heads P2*, *Casting Pier Heads* pada *RC Pier Heads P2*, *Installation of Elastomeric Bearing Pads* pada *P2*, *Installation of Anchor Bar* pada *P2*, *Reinforcement Steel Works* dan *Casting RC Slab* pada *P28-P29*, serta *Reinforcement Steel Works* dan *Casting RC Slab* pada *P29-A1*.
2. Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan optimasi, ditemukan pada alternatif lembur, skenario lembur 3 jam menjadi alternatif yang paling optimal, dengan durasi 320,83 hari dan biaya sebesar Rp 88,119,661,076.48. Sedangkan pada alternatif *shift* kerja, skenario iterasi ke-10 menjadi alternatif yang paling optimal, dengan durasi 307,10 hari dan biaya sebesar Rp 87,566,528,176.75. Sehingga, dari 2 hasil tersebut, didapatkan alternatif percepatan yang memiliki durasi dan biaya optimum adalah alternatif *shift* kerja dengan durasi 307,10 hari dan biaya sebesar Rp 87,566,528,176.75.

5.2 Saran

Pada penelitian ini, integrasi *Python* hanya diterapkan pada tahap penentuan jalur kritis, perhitungan *cost slope*, dan penentuan alternatif optimum. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas cakupan integrasi *Python* hingga mencakup keseluruhan proses perhitungan TCTO, termasuk perhitungan *crash cost*

dan *crash duration*, sehingga proses analisis dapat dilakukan secara lebih menyeluruh, otomatis, dan efisien. Serta disarankan untuk menambahkan alternatif lain seperti penambahan alat berat dan juga penambahan tenaga kerja.



DAFTAR PUSTAKA

- Andra, M. B., Hermaliani, E. H., & Subekti, A. (2025). User-Friendly Python Tools Education for Digital Transformation of Madaris Management Edukasi Python Tools Ramah Pengguna Guna Transformasi Digital Manajemen Madaris. *CONSEN: Indonesian Journal of Community Services and Engagement*, 5(2), 210–217. <https://doi.org/10.57152/consen.v5i2.2237>
- Elita Saragi, T., & Uli Situmorang, R. A. (2022). OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA PERCEPATAN PROYEK MENGGUNAKAN METODE TIME COST TRADE OFF DENGAN ALTERNATIF PENAMBAHAN TENAGA KERJA DAN JAM KERJA (LEMBUR) (Studi Kasus : Pembangunan Gedung Convention Hall Kab. Deli Serdang). *CONSTRUCT : Jurnal Teknik Sipil*, 1(2).
- Fardila, D., & Adwayah, N. R. (2021). Optimasi Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi dengan Lembur dan Penambahan Tenaga Kerja. *INERSIA: LNformasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 17(1), 35–46. <https://doi.org/10.21831/inersia.v17i1.39499>
- Hendriyani, I., Pratiwi, R., & Qadri, N. (2020). OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA PADA PELAKSANAAN PROYEK PENINGKATAN JALAN BINA BAKTI KELURAHAN GUNUNG SETELEM KABUPATEN PENAJAM PASER UTARA DENGAN METODE TIME COST TRADE OFF (TCTO). *Jurnal TRANSUKMA*, 3.
- Husen, A. (2011). *MANAJEMEN PROYEK*.
- Kerzner, H. (2009). *PROJECT MANAGEMENT: A SYSTEMS APPROACH TO PLANNING, SCHEDULING, AND CONTROLLING*.
- Lutz, M. (2009). *Learning Python* (J. Steele, Ed.; 4th ed.). O'Reilly Media.
- Maulana, M. H. (2024). Python Bahasa Pemrograman Yang Ramah Bagi Pemula. *JISCO (Journal of Information System and Computing)*, 2, 73–78.

Megawati, L. A., & Lirawati. (2020). ANALISIS FAKTOR KETERLAMBATAN PROYEK KONSTRUKSI BANGUNAN GEDUNG. *Jurnal Teknik*, 21(2).

Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia. (2004). *KEPMEN NO. 102 TAHUN 2004*.

Pratiwi, R., Mulia Devi, S., Marini, A., & Maya Sari, H. (2022). OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA DENGAN METODE TIME COST TRADE OFF (TCTO) PADA PROYEK PENAMBAHAN BANGUNAN PASAR RAKYAT. *Jurnal TRANSUKMA*, 4(2).

Rabbani, G. M., & Supriyadi, I. (2022). Analisis Reduksi Waktu Dalam Percepatan Pelaksanaan Proyek Konstruksi Gedung Menggunakan Metode Crashing. *Jurnal Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil (MoDuluS)*, 4(2), 52–60.

Rahmanto, T., & Janizar, S. (2022). PENGENDALIAN BIAYA DAN WAKTU DENGAN METODE EARNED VALUE PROYEK FAMILIA URBAN BEKASI. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia*, 3(2).

Rajagukguk, T. B. N., Winanda, L. A. R., Munasih, & Surbakti, S. (2026). Optimalisasi Penjadwalan Proyek Menggunakan Metode Time-Cost Trade Off. *Jurnal Konstruksi*, 24(1), 94–100. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.24-1.3205>

Sa'adah, N., Iqrammah, E., & Rijanto, T. (2021). Evaluasi Proyek Pembangunan Gedung Stroke Center (Paviliun Flamboyan) Menggunakan Metode Critical Path Method (CPM) Dan Crashin. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (PROTEKSI)*, 3(2).

Sanaky, M. M., Saleh, L. Moh., & Titaley, H. D. (2021). ANALISIS FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB KETERLAMBATAN PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG ASRAMA MAN 1 TULEHU MALUKU TENGAH. *JURNAL SIMETRIK*, 11(1).

Setiawan, I., Siboro, I., & Faisyal, M. (2021). OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA PROYEK MENGGUNAKAN METODE TIME COST TRADE OFF (TCTO)

TIME AND COST PROJECT OPTIMIZATION USING TIME COST TRADE OFF METHOD. *Jurnal TRANSUKMA*, 03(02).

Sinurat, F., & Misdalena, F. (2024). Analisis Manajemen Proyek Dengan Metode Critical Path Method (CPM) Pada Proyek Pembangunan Gedung Chandra Tanjung Karang. *Jurnal Konstruksi*, 22(2), 98–107. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.22-2.2131>

Sulistyo, A. B., & Al Fikri, M. (2021). ANALISIS OPTIMALISASI WAKTU DAN BIAYA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN METODE TIME COST TRADE OFF (STUDI KASUS: PROYEK PEMBANGUNAN JALAN GORDA-BANDUNG). *Jurnal InTent*, 4(1).

VanderPlas, J. (2016). *Python Data Science Handbook*. O'Reilly Media. www.allitebooks.com

LAMPIRAN

