

ALGORITMA HEURISTIK UNTUK MENENTUKAN BIAYA CRASHING MINIMUM PADA PROJECT NETWORK DENGAN DUA JALUR KRITIS: STUDI KASUS PROYEK PRODUKSI ELECTRICAL HOUSE OLEH PT X

Berry Yuliandra¹, Rini Syahfitri²

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

²Jurusan Teknik Industri, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

Email: berry@ft.unand.ac.id

Abstract

PT X is a company engaged in the production of module, ship relay station (Electrical House) as well as oil and gas mining equipment. The company uses a project-based production systems in the production process of those equipment. Type of project usually performed is the Engineering-Procurement-Construction (EPC) project. EPC is a type of project that involves process engineering, material procurement and products construction. PT X main product is a module or electrical house (E-House). Activities can be disrupted by a variety of conditions in the project implementation phase, such as weather and other unforeseen events. These conditions can hamper the process and affect the performance on the field. Activity scheduling and load out process which often suffer from delays caused project deadlines are often past the limit given by the client. As in the case of E-House project examined in this study, its implementation has been delayed and should be accelerated for 8 days. Therefore, the crashing project can greatly assist in adjusting the implementation plan with the actual condition. Crashing project analysis conducted based on project network diagram. Critical path is determined using Crithical Path Method (CPM). Based on analysis results, project execution time can be shortened up to 8 days earlier. (From the normal time of 94 days to 86 days) at the cost \$ 4.203.093,25.

Keywords: Project management, heuristic algorithm, crashing project, Engineering-Procurement-Construction project, electrical house

Abstrak

PT X merupakan perusahaan yang bergerak dalam bisnis produksi module, gardu kapal (Electrical House) serta peralatan dalam penambangan minyak bumi dan gas. Perusahaan tersebut menggunakan sistem produksi berbasis proyek dalam proses produksinya. Jenis proyek yang biasa dikerjakan oleh perusahaan ini adalah proyek Engineering-Procurement-Construction (EPC). Proyek EPC merupakan tipe proyek yang melibatkan proses rekayasa, pembelian material, serta kontruksi produk. Salah satu jenis produk yang diproduksi oleh PT X adalah module atau electrical house (E-House). Dalam pelaksanaannya aktivitas-aktivitas proyek dapat terganggu oleh berbagai kondisi, seperti cuaca dan kejadian tidak terduga lainnya. Kondisi tersebut dapat menghambat proses pelaksanaan dan mempengaruhi kinerja di lapangan. Kegiatan penjadwalan serta proses load out yang sering mengalami delay menyebabkan pengerjaan proyek sering kali melewati batas deadline yang diberikan oleh klien. Seperti dalam kasus proyek E-House yang dikaji dalam penelitian ini, pelaksanaannya mengalami keterlambatan sehingga harus mengalami percepatan selama 8 hari. Oleh karena itu, crashing project diperlukan untuk menyesuaikan rencana pelaksanaan proyek dengan kondisi aktual yang terjadi. Analisis crashing project dilakukan berdasarkan diagram jaringan proyek Ten E-House. Lintasan kritis ditentukan menggunakan metode Crithical Path Method (CPM). Berdasarkan hasil analisis waktu pelaksanaan proyek dapat diperpendek maksimum 8 hari lebih awal. (Dari waktu normal 94 hari menjadi 86 hari) dengan mengorbankan biaya sebesar \$ 4.203.093,25.

Kata kunci: Manajemen Proyek, algoritma heuristik, crashing project, proyek Engineering-Procurement-Construction, electrical house

1. PENDAHULUAN

Proyek dalam konteks sistem produksi merupakan salah satu tipe strategi respon terhadap permintaan konsumen, khususnya bagi tipe permintaan *design to order* dan *make to order*. Karakteristik utama sistem produksi proyek adalah memiliki rentang waktu pengerjaan tertentu serta menghasilkan produk yang bersifat unik. Proses perencanaan dan pengendalian proyek dilakukan menggunakan konsep manajemen proyek [1].

Sifat unik dari produk yang dihasilkan menyebabkan manajemen proyek rentan terhadap berbagai risiko yang dapat mempengaruhi jalannya proyek. Berbagai hambatan tak terduga seperti kondisi cuaca, keterlambatan pengiriman serta berbagai kejadian lainnya dapat mempengaruhi kinerja lapangan sehingga pada akhirnya akan memperlambat penyelesaian proyek. Kondisi ini juga berlaku pada jenis proyek *Engineering-Procurement-Construction* (EPC).

Proyek EPC melibatkan aktivitas perancangan, pengadaan serta proses konstruksi yang kompleks dalam pelaksanaannya. Urutan aktivitas pengerjaan yang terstruktur secara sistematis dan perencanaan yang matang merupakan faktor kunci dalam keberhasilan pelaksanaan proyek EPC. Oleh karena itu proses penjadwalan proyek harus diperhatikan dengan baik dan seksama.

PT X merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang produksi modul gardu kapal (*Electrical House*) serta peralatan tambang minyak bumi dan gas. Produk utama PT X adalah *Electrical House*. Produksi *Electrical House* baru dilakukan jika PT X telah memenangkan proses *bidding*. Jenis *Electrical House* yang diproduksi juga disesuaikan dengan jadwal dan spesifikasi yang diinginkan oleh klien. Oleh karena itu PT X membangun *Electrical House* dengan sistem produksi berbasis proyek. Proyek *Electrical House* yang dilakukan oleh PT X meliputi proses desain dan rekayasa, pembelian material sampai konstruksi produk sehingga proyek ini dapat digolongkan sebagai proyek EPC.

Pelaksanaan proyek *Electrical House* seringkali menemukan kendala dilapangan, terutama permasalahan yang berkaitan dengan rencana kegiatan proyek. Kegiatan penjadwalan proyek serta proses *load out* seringkali mengalami *delay* sehingga waktu penyelesaian proyek melewati batas *deadline* yang diberikan oleh klien. Seperti dalam kasus proyek *Electrical House* yang dikaji dalam penelitian ini, pelaksanaannya

mengalami keterlambatan sehingga harus mengalami percepatan selama 8 hari. Oleh karena itu perlu dilakukan *crashing project* untuk menyesuaikan rencana pelaksanaan proyek dengan kondisi aktual.

Pelaksanaan *crashing project* mempercepat pelaksanaan proyek dengan menambahkan sumber daya pada satu atau lebih aktivitas. Hal ini berarti bahwa pelaksanaan *crashing project* akan meningkatkan total biaya pelaksanaan proyek. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan hasil analisis *crashing project* dalam usaha mempercepat rencana pelaksanaan proyek *Electrical House* yang dikerjakan oleh PT X. Proses *crashing project* yang cukup panjang (percepatannya yang dilakukan mencapai 8 hari) menyebabkan ditemuinya *project network* dengan dua jalur kritis. Proses *crashing project* untuk dua jalur kritis berbeda dengan proses untuk satu jalur kritis. Proses percepatan harus dilakukan pada kedua jalur kritis sekaligus. Oleh karena itu selain melakukan analisis *crashing project*, penelitian juga difokuskan untuk mengembangkan metode untuk melakukan *crashing project* pada *project network* dengan dua jalur kritis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proyek dan Manajemen Proyek

Proyek dapat didefinisikan sebagai proses pembuatan produk atau jasa yang bersifat unik dalam rentang waktu terbatas [2]. Sebuah proyek memiliki awal dan akhir yang telah ditentukan dan baru dianggap berakhir jika tujuan dari proyek tersebut telah tercapai. Sifat unik dari produk atau jasa yang dihasilkan berarti bahwa hasil dari proyek memiliki perbedaan dengan produk atau jasa lain yang sejenis. Sebagai contoh terdapat ribuan gedung yang dibuat melalui proyek konstruksi akan tetapi masing-masing gedung tersebut memiliki perbedaan antara satu dengan lainnya. Oleh karena itu, produk atau jasa yang akan diproduksi melalui proyek dikembangkan dengan detail dan mendalam secara bertahap. Proyek termasuk salah satu strategi proses produksi dalam bidang kajian sistem produksi [1].

Strategi proyek bisa digunakan untuk menanggapi tipe permintaan *design-to-order* dan *make-to-order*. *Design-to-order* adalah tipe permintaan dimana proses desain dan produksi produk dilakukan setelah ada permintaan dari konsumen. Pada *make-to-order* produksi baru dilaksanakan setelah

ada permintaan dari konsumen, berdasarkan desain yang telah ada sebelumnya (Gasperz, 2004). Proyek pada prakteknya banyak digunakan untuk menangani tipe permintaan *design-to-order*. Produk yang berkaitan dengan tipe permintaan *design-to-order* biasanya memiliki keunikan total pada setiap unitnya. Beberapa contohnya antara lain: kapal pesiar, gedung, jembatan dan sebagainya.

Proses pengerjaan proyek dikelola menggunakan pendekatan manajemen proyek [3]. Duncan [2] mendefinisikan manajemen proyek sebagai implementasi dari pengetahuan, skill, teknik dan peralatan untuk melaksanakan aktivitas-aktivitas proyek sehingga dapat memenuhi kebutuhan dan ekspektasi *stakeholder*. Level keberhasilan atau kegagalan manajemen proyek dinilai menggunakan tiga *success criteria* [4]. Ketiga *success criteria* tersebut adalah waktu, biaya dan kualitas [5]. Atkinson [6] menyebut ketiga *success criteria* tersebut dengan istilah "*the iron triangle*" karena secara konsisten digunakan dalam pendefinisian manajemen proyek.

Perencanaan dan pengendalian proyek, termasuk kegiatan penjadwalan dan *crashing project*, didasarkan pada *the iron triangle*. Pelaksanaannya didasarkan pada asumsi utama bahwa terdapat *trade-off* diantara ketiga *success criteria* [5,7]. Asumsi tambahan lain yang biasa digunakan antara lain [7]:

1. Satu-satunya biaya yang relevan adalah biaya yang dikenakan oleh sub-kontraktor.
2. Peningkatan kualitas akan menambah biaya proyek.
3. Meningkatkan kualitas akan menambah lama waktu pengerjaan proyek.
4. Memperpendek waktu pengerjaan proyek akan meningkatkan biaya.
5. Biaya proyek akan meningkat jika lebih banyak sumber daya yang diaktifkan dalam waktu bersamaan.

2.2. Crashing Project

Crashing project merupakan salah satu *tool* dalam manajemen proyek yang digunakan untuk memperpendek durasi waktu pelaksanaan proyek dengan biaya

seminimum mungkin. Pada dasarnya *crashing project* merupakan *trade-off* antara waktu dan biaya, sehingga asumsi tambahan nomor 4 dan nomor 5 menjadi berlaku. Beberapa alasan yang menjadikan perlunya *crashing project* antara lain:

1. Pengerjaan proyek tertinggal dari jadwal yang telah ditetapkan sebelumnya.
2. *Deadline* proyek dimajukan dari rencana awal.

Terdapat dua terminologi tambahan terkait waktu pelaksanaan dalam analisis *crashing project*, yaitu:

1. Waktu Normal.

Waktu pelaksanaan proyek tanpa adanya percepatan. Biaya pelaksanaan aktivitas dalam waktu normal disebut biaya normal.

2. Waktu *Crash*.

Durasi waktu terpendek yang dibutuhkan untuk menyelesaikan sebuah aktivitas. Biaya pelaksanaan aktivitas dalam waktu *crash* disebut biaya *crash*. Biaya *crash* lebih mahal daripada biaya normal karena untuk memperpendek waktu pelaksanaan aktivitas diperlukan sumber daya tambahan.

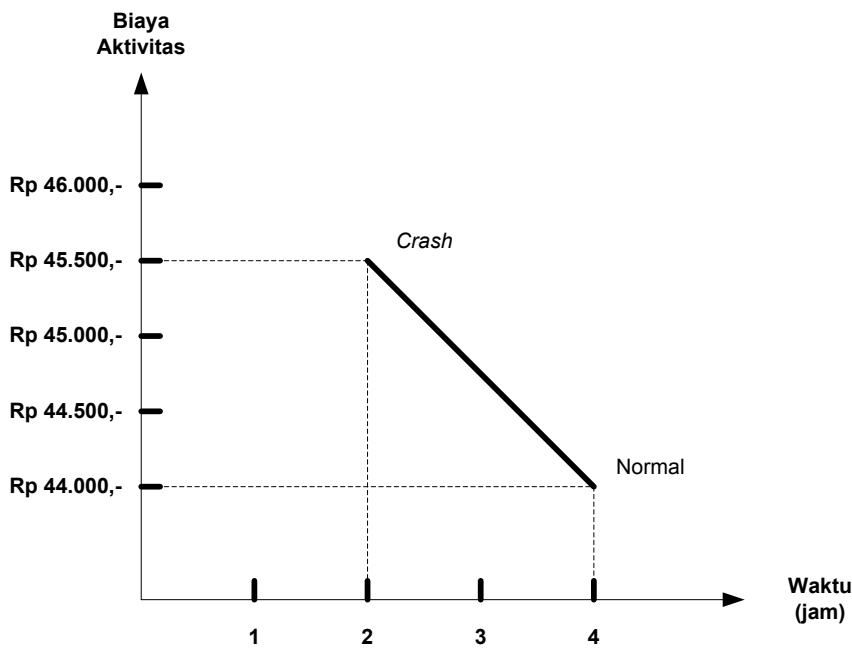
Tidak seluruh aktivitas perlu diperpendek mempercepat proses pelaksanaan proyek. Beberapa hal perlu diperhatikan dalam memilih aktivitas yang akan diperpendek waktu pelaksanaannya, antara lain:

1. Pengurangan yang mungkin dilakukan terhadap durasi waktu pengerjaan aktivitas tersebut.
2. Pengurangan waktu yang dilakukan dapat menyebabkan proyek diselesaikan pada waktu yang diharapkan.
3. Biaya *crashing* harus semimumimum mungkin.

Crashing project dilakukan dengan tahapan sebagai berikut [8]:

1. Menghitung biaya *crash* per periode untuk setiap aktivitas proyek.

Biaya *crash* diasumsikan linier terhadap waktu, sehingga perubahan biaya *crash* akan membentuk kurva seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Biaya-Waktu Aktivitas Proyek

Berdasarkan asumsi tersebut, biaya *crash* per periode dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Biaya Crash per periode} = \frac{B_c - B_n}{W_n - W_c} \quad (1)$$

Dimana:

B_c = Biaya *crash*
 B_n = Biaya normal
 W_n = Waktu normal
 W_c = Waktu *crash*

2. Menentukan jalur kritis proyek.
 Durasi pelaksanaan proyek ditentukan oleh jalur kritis. Agar *crashing project* bisa memperpendek waktu pelaksanaan proyek, maka aktivitas yang akan diperpendek harus merupakan aktivitas kritis.
3. Memilih aktivitas yang akan diperpendek durasi waktu pelaksanaannya.
 Pemilihan aktivitas yang akan diperpendek bergantung pada jumlah jalur kritis yang terdapat dalam *project network*:
 - a. Apabila hanya terdapat satu jalur kritis, maka pilih aktivitas yang memenuhi kriteria:
 - Durasi pelaksanaannya masih bisa diperpendek
 - Memiliki biaya *crash* per periode terkecil*Crashing* dilakukan untuk satu periode.
 - b. Apabila terdapat lebih dari satu jalur kritis, maka pilih satu aktivitas dari

masing-masing jalur kritis yang memenuhi kriteria:

- Durasi pelaksanaannya masih bisa diperpendek
- Memiliki biaya *crash* per periode terkecil

Crashing dilakukan untuk satu periode.

4. Perbarui semua waktu pelaksanaan aktivitas proyek.

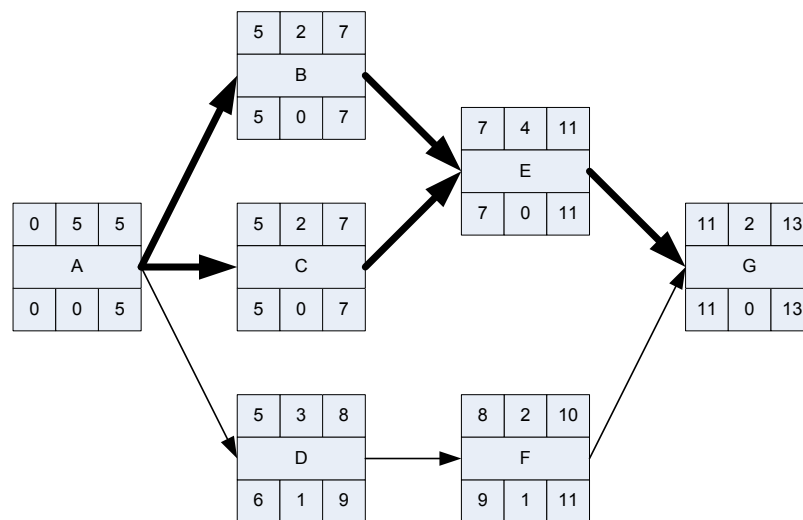
Apabila batas waktu yang diinginkan telah terpenuhi, berhenti. Jika tidak kembali ke Langkah nomor 2.

Pada umumnya permasalahan *crashing* hanya melibatkan *project network* dengan satu jalur kritis, tetapi tidak tertutup kemungkinan bahwa *project network* memiliki lebih dari satu jalur kritis. Apabila *project network* tersebut memiliki lebih dari satu jalur kritis, maka menurut cara pemecahan yang dibahas sebelumnya penyelesaian masalah ini dilakukan dengan melakukan *crashing* pada satu aktivitas dari setiap jalur kritis. Biaya *crashing project* adalah jumlah dari biaya *crashing* kedua aktivitas tersebut. Aktivitas-aktivitas yang dipilih adalah aktivitas yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil untuk menjamin agar biaya *crashing* minimum.

Akan tetapi, pada beberapa kasus cara tersebut dapat menyebabkan terabaikannya alternatif lain yang memiliki potensi biaya *crashing project* lebih kecil. Ilustrasi yang

ditampilkan dalam Gambar 2 dapat menggambarkan kondisi tersebut.

Aktivitas	Waktu Normal	Biaya Normal	Waktu Crash	Biaya Crash	Biaya Crash per Periode
A	5	Rp 4.000	3	Rp 6.000	Rp 1.000
B	2	Rp 1.500	1	Rp 1.900	Rp 400
C	2	Rp 1.500	1	Rp 2.000	Rp 500
D	3	Rp 1.000	2	Rp 3.000	Rp 2.000
E	4	Rp 3.500	2	Rp 5.000	Rp 750
F	2	Rp 1.500	1	Rp 4.500	Rp 3.000
G	2	Rp 1.500	1	Rp 4.500	Rp 3.000



Gambar 2. Ilustrasi Permasalahan

Berdasarkan ilustrasi dapat dilihat bahwa terdapat dua jalur kritis pada *project network* yang ada, yaitu: A-B-E-G dan A-C-E-G. Durasi proyek hanya dapat dipercepat jika *crashing* dilakukan pada kedua jalur kritis tersebut. Pada tabel yang terdapat dalam Gambar 2 dapat dilihat bahwa aktivitas yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil adalah Aktivitas B, yaitu Rp 400,-. Oleh karena itu *crashing* dilakukan pada Aktivitas B. Akan tetapi karena Aktivitas B hanya berada pada salah satu jalur kritis, maka perlu dilakukan *crashing* pada aktivitas yang berada pada jalur kritis lain. Aktivitas berikutnya yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil adalah Aktivitas C, yaitu Rp 500,-. Aktivitas C berada pada jalur kritis yang berbeda dari Aktivitas B, oleh karena itu aktivitas ini dapat dipilih sebagai aktivitas yang dipercepat pelaksanaannya. Total biaya *crashing project* yang diperlukan adalah jumlah dari biaya *crash* Aktivitas B dan

Aktivitas C, yaitu Rp 900,-.

Secara sepintas solusi ini tampak sebagai jawaban yang tepat bagi kasus ini. Akan tetapi jika analisis dilanjutkan pada aktivitas kritis lainnya, akan diketahui bahwa memilih Aktivitas E akan memberikan biaya *crashing project* yang lebih kecil. Aktivitas E berada pada kedua jalur kritis sehingga dengan hanya melakukan *crashing* pada Aktivitas E akan mempercepat durasi pelaksanaan kedua jalur kritis yang ada. Biaya *crash* per periode Aktivitas E adalah Rp 750,- jumlah yang lebih kecil dibandingkan total biaya *crashing* Aktivitas B dan Aktivitas C (Rp 900,-). Oleh karena itu solusi terbaik sebenarnya adalah melakukan *crashing* hanya pada Aktivitas E.

Ilustrasi tersebut merupakan suatu contoh dimana perencanaan *crashing project* yang biasa digunakan bisa saja tidak memberikan biaya minimum, khususnya pada *project network* dengan lebih dari satu jalur kritis. Oleh karena itu dibutuhkan

algoritma yang dapat membantu proses perencanaan *crashing project*, khususnya dalam pemilihan aktivitas kritis yang akan dipercepat durasi pelaksanaannya.

Satu hal yang penting untuk diingat adalah proses *crashing* harus dilakukan pada aktivitas kritis (aktivitas yang berada dalam jalur kritis) agar pelaksanaannya efektif. Hal ini disebabkan karena durasi total proyek ditentukan oleh durasi jalur kritis. Mempercepat pelaksanaan aktivitas yang diluar jalur kritis tidak akan mempengaruhi durasi total proyek.

2.3. Analisis Jalur Kritis

Jalur kritis merupakan jalur waktu terpanjang dalam sebuah *project network*. Analisis jalur kritis merupakan *tool* terpenting dalam manajemen waktu proyek. Metode untuk mengidentifikasi jalur kritis adalah *Critical Path Method* (CPM). CPM dikembangkan oleh DuPont Corporation dan Remington Rand Corporation pada tahun 1940-1943. Awalnya metode ini digunakan sebagai cara untuk mengelola proyek perawatan pabrik [9].


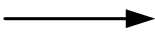
Analisis CPM dilakukan pada *project network*. *Project network* merupakan diagram jaringan yang menggambarkan hubungan antar aktivitas-aktivitas yang harus dilakukan untuk menyelesaikan sebuah proyek. Aturan dasar yang harus diperhatikan dalam penyusunan *project*

network antara lain [1]:

1. Aliran *project network* disusun dari kiri ke kanan.
2. Suatu aktivitas tidak bisa dimulai kecuali seluruh aktivitas pendahulu langsungnya telah diselesaikan terlebih dahulu.
3. Setiap aktivitas ditandai dengan nomor kode identifikasi yang bersifat unik.
4. Nomor kode identifikasi aktivitas harus lebih besar dibandingkan nomor kode aktivitas pendahulunya.
5. Tidak diperbolehkan adanya *looping*.
6. Pernyataan kondisional (seperti *if*) tidak diizinkan.
7. Jika terdapat beberapa aktivitas awal (aktivitas yang tidak memiliki pendahulu langsung), maka sebuah *node* bayangan yang menjadi titik permulaan proyek boleh ditambahkan. *Node* bayangan tersebut dianggap tidak memiliki waktu pengerjaan (waktu pengerjaannya = 0). Hal yang sama juga berlaku untuk aktivitas akhir (aktivitas yang tidak memiliki pengikut langsung) proyek.

Terdapat dua elemen dalam *project network*, yaitu *node* dan *arrow*. Penggambaran kedua elemen tersebut dapat dilakukan berdasarkan pendekatan *Activity on Arrow* (AOA) atau *Activity on Node* (AON). Perbedaan penggunaan kedua elemen tersebut pada masing-masing pendekatan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Elemen pada *Project Network* [1]

Elemen	Bentuk	Fungsi	
		AOA	AON
<i>Node</i>		Menggambarkan kejadian/ <i>event</i>	Menggambarkan aktivitas proyek
<i>Arrow</i>		Menggambarkan aktivitas proyek	Menunjukkan hubungan antar aktivitas

Asumsi utama yang digunakan pada CPM adalah waktu pelaksanaan dari setiap aktivitas proyek diketahui dengan pasti, sehingga hanya ada satu faktor waktu untuk masing-masing aktivitas. Proses identifikasi

jalur kritis dengan menggunakan CPM dilakukan berdasarkan empat terminologi waktu. Terminologi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Terminologi Waktu pada CPM

Terminologi	Definisi
<i>Earliest Start</i> (ES)	Waktu mulai paling awal dari suatu aktivitas, dengan asumsi bahwa semua aktivitas pendahulu langsungnya sudah selesai dikerjakan.
<i>Earliest Finish</i> (EF)	Waktu penyelesaian paling awal dari suatu aktivitas.
<i>Latest Start</i> (LS)	Waktu mulai paling akhir dari suatu aktivitas tanpa menunda waktu penyelesaian keseluruhan proyek.
<i>Latest Finish</i> (LF)	Waktu penyelesaian paling akhir dari suatu aktivitas tanpa menunda waktu penyelesaian keseluruhan proyek.

Identifikasi jalur kritis dengan CPM dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut [1]:

1. Menentukan *project network*.
Project network disusun menggunakan cara yang telah dibahas pada bagian sebelumnya.
2. Proses *two-pass*.
Terdiri atas dua tahap, yaitu:
 - a. *Forward Pass*
Tahap ini dilakukan untuk menentukan nilai ES dan EF. Terdapat dua aturan dasar dalam *forward pass*:
 - Aturan ES
Jika sebuah aktivitas hanya memiliki satu pendahulu langsung, maka ES aktivitas tersebut sama dengan EF pendahulunya. Akan tetapi jika suatu aktivitas memiliki beberapa pendahulu langsung, maka ES aktivitas tersebut sama dengan nilai maksimum dari semua EF pendahulunya.
 - Aturan EF
EF ditentukan menggunakan persamaan berikut:
$$EF = ES + t_i \quad (2)$$
 Dimana
t = durasi pelaksanaan aktivitas ke-i
i = 1, 2, 3 ... n
 - b. *Backward Pass*
Tahap ini dilakukan untuk menentukan nilai LF dan LS. Seperti pada *Forward Pass*, juga terdapat dua aturan dasar dalam tahap ini, yaitu:
 - Aturan LF
Jika suatu aktivitas hanya menjadi pendahulu langsung bagi satu aktivitas lain, maka LF aktivitas tersebut sama dengan LS pengikutnya. Akan tetapi jika suatu aktivitas merupakan pendahulu langsung bagi beberapa aktivitas lain, maka LF aktivitas tersebut sama dengan nilai minimum dari seluruh LS pengikutnya.
 - Aturan LS
LS ditentukan menggunakan persamaan berikut:
$$LS = LF - t_i \quad (3)$$
 Dimana
t = durasi pelaksanaan aktivitas ke-i
i = 1, 2, 3 ... n
3. Menghitung waktu *slack*.
Waktu *slack* adalah toleransi pengunduran terhadap pelaksanaan

suatu aktivitas tanpa menyebabkan keterlambatan penyelesaian proyek secara keseluruhan. Perhitungan waktu *slack* dapat dilakukan menggunakan persamaan:

$$Slack = LS - ES \quad (4)$$

atau

$$Slack = LF - EF \quad (5)$$

Aktivitas dengan waktu *slack* = 0 disebut sebagai aktivitas kritis dan merupakan basis utama dalam menentukan jalur kritis.

4. Identifikasi jalur kritis.
Jalur kritis merupakan jalur tidak terputus disepanjang *project network* yang memenuhi syarat berikut:
 - a. Dimulai pada aktivitas pertama.
 - b. Hanya terdiri dari aktivitas kritis.
 - c. Diakhiri pada aktivitas terakhir.
5. Analisis.
Fokus utama analisis adalah aktivitas-aktivitas yang berada dalam jalur kritis. Keberhasilan pelaksanaan jadwal proyek bergantung sepenuhnya pada eksekusi seluruh aktivitas kritis. Keterlambatan pelaksanaan aktivitas kritis berarti keterlambatan bagi penyelesaian proyek, sebaliknya mempercepat pelaksanaan aktivitas kritis akan mempercepat penyelesaian proyek.

2.4. Biaya Proyek

Secara garis besar, biaya proyek dapat dikelompokkan ke dalam dua komponen utama, yaitu [10]:

1. Biaya Langsung
Biaya langsung merupakan biaya untuk memperoleh sumber daya yang akan digunakan untuk menyelesaikan proyek. Jenis biaya ini bergantung pada volume pekerjaan proyek. Unsur-unsur yang termasuk dalam biaya langsung antara lain:
 - a. Biaya Material
Biaya yang dikeluarkan untuk membeli kebutuhan material bagi pelaksanaan proyek. Meliputi biaya transportasi, biaya penyimpanan serta kerugian akibat kehilangan atau kerusakan material. Harga material biasanya diperoleh dari hasil survei pasar atau berpedoman kepada indeks biaya yang dikeluarkan secara berkala oleh Departemen Pekerjaan Umum.
 - b. Upah Pekerja
Upah pekerja biasanya dibedakan atas: upah harian, upah borongan dan upah berdasarkan produktivitas.

- c. Biaya Peralatan
Biaya peralatan biasanya terdiri atas: modal, biaya sewa, biaya operasi, biaya pemeliharaan, biaya operator, biaya mobilisasi, biaya demobilisasi dan unsur-unsur biaya lainnya yang terkait secara langsung dengan peralatan proyek.

- d. Biaya Sub-Kontraktor
Biaya ini muncul apabila ada bagian pekerjaan yang diserahkan kepada sub-kontraktor. Tanggung jawab dan pembayaran terhadap sub-kontraktor biasanya dilakukan oleh kontraktor utama.

2. Biaya Tidak Langsung

Biaya tidak langsung adalah biaya yang berhubungan dengan pengawasan, pengarahan kerja dan pengeluaran umum diluar biaya konstruksi. Istilah lain untuk biaya ini adalah biaya *overhead*. Jenis biaya ini tidak tergantung pada volume pekerjaan tetapi terhadap jangka waktu pelaksanaan pekerjaan. Semakin lama waktu pelaksanaan proyek maka akan semakin tinggi biaya tidak langsung yang harus dikeluarkan. Unsur-unsur biaya tidak langsung yang umum ditemui antara lain:

- Gaji pegawai.
- Biaya umum kantor.
- Biaya pengadaan sarana umum.

2.5. Hubungan Biaya Terhadap Waktu Pelaksanaan Proyek

Biaya dan waktu termasuk *success criteria* manajemen proyek. Asumsi yang berlaku diantara kedua *success criteria* ini adalah [7]:

- Memperpendek waktu pengerjaan proyek akan meningkatkan biaya.
- Biaya proyek akan meningkat jika lebih banyak sumber daya yang diaktifkan dalam waktu bersamaan.

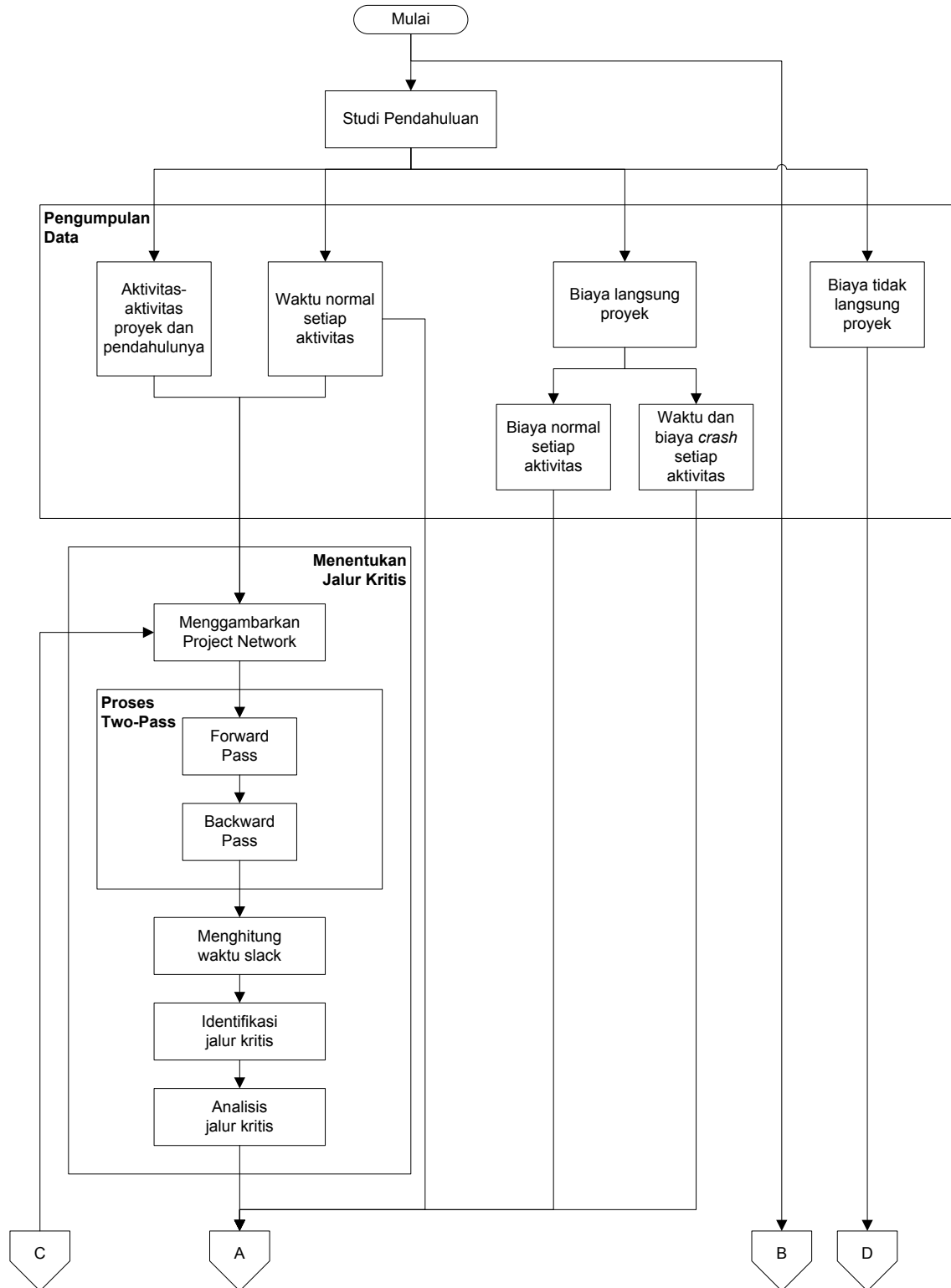
Percepatan waktu pelaksanaan proyek hanya bisa terjadi apabila sumber daya yang digunakan untuk mengerjakan proyek ditambah. Penambahan sumber daya ini dapat berupa [10]:

- Penambahan jam kerja (lembur).
- Penambahan tenaga kerja.
- Penambahan peralatan
- Mengganti peralatan kerja dengan peralatan lain dengan teknologi yang lebih canggih.
- Mengganti metode kerja.
- Mengkonsentrasikan seluruh sumber daya pada aktivitas tertentu.
- Kombinasi dari berbagai alternatif yang telah disebutkan sebelumnya.

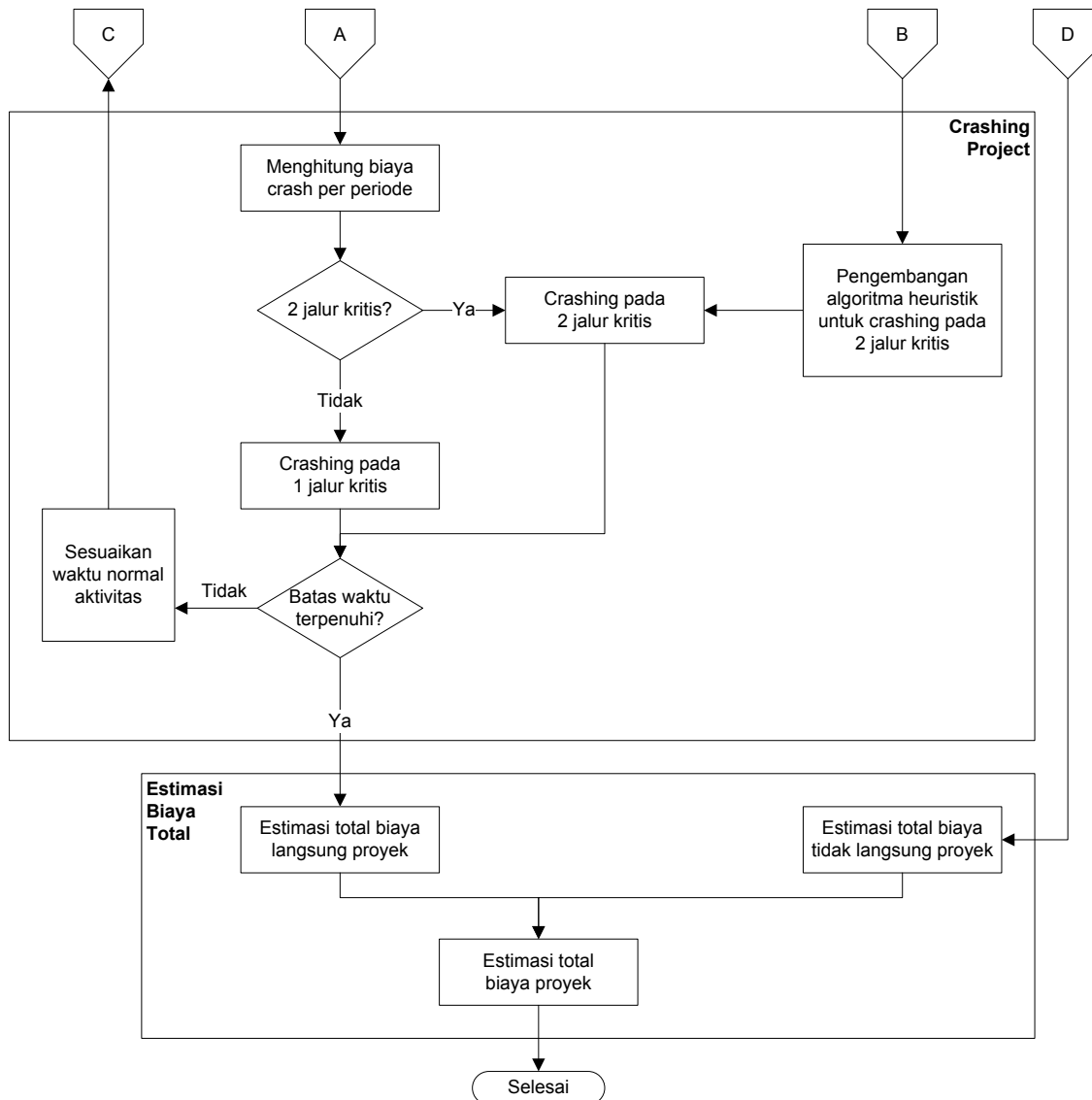
Berdasarkan asumsi kedua, biaya langsung akan meningkat apabila waktu pelaksanaan proyek dipercepat karena lebih banyak sumber daya yang diaktifkan dalam waktu bersamaan. Kondisi ini akan mengarah pada asumsi pertama bahwa mempercepat pelaksanaan proyek akan meningkatkan total biaya proyek.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Crashing project pada proyek produksi *Electrical House* PT X dilakukan dengan mengikuti prosedur standar seperti yang dikemukakan oleh Heizer dan Render [8]. Hanya saja penelitian yang dilakukan juga mengembangkan sendiri algoritma untuk menentukan biaya *crashing* minimum jika terdapat dua jalur kritis pada *project network*. Algoritma tersebut digunakan apabila ditemukan dua jalur kritis pada saat melakukan *crashing project* proyek produksi *Electrical House* PT X. *Flowchart* metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart Metodologi Penelitian



Gambar 3. Flowchart Metodologi Penelitian (lanjutan)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Crashing Project pada Produksi Electrical House

Penelitian diawali dengan tahap studi pendahuluan untuk mempelajari sistem dari proyek *Electrical House* serta mengumpulkan data-data terkait yang dibutuhkan. Studi pendahuluan dilaksanakan melalui tinjauan lapangan dan wawancara dengan pihak-pihak terkait. Data yang dikumpulkan antara lain: Berbagai aktivitas yang perlu dilaksanakan untuk menyelesaikan proyek, waktu normal setiap aktivitas, waktu *crash* setiap aktivitas serta biaya langsung dan tidak langsung proyek. Biaya langsung

proyek digunakan untuk menentukan biaya normal dan biaya *crash*.

Identifikasi aktivitas-aktivitas proyek dilakukan melalui wawancara dengan pihak terkait. Secara garis besar, proyek *Electrical House* dapat dibagi ke dalam tiga tahapan utama. Ketiga tahapan tersebut antara lain:

1. *Preparation*
2. *Construction*
3. *Load Out*

Ketiga tahapan tersebut dapat lebih didetailkan dengan memecahnya menjadi serangkaian aktivitas. Seluruh aktivitas proyek *Electrical House* beserta durasi pelaksanaannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Aktivitas-Aktivitas dalam Proyek *Electrical House*

No.	Aktivitas	Durasi (hari)	Kode	Aktivitas Pendahulu
1	Design Module	3	A	-
2	Air Lock Room	9	N	A
3	VFD	10	I	B
4	Architectural	3	H	C
5	Piping	16	C	C
6	Painting	7	F	D, E
7	Blasting	8	E	D
8	Battery Room	6	M	G, F
9	HVAC	5	Q	H
10	E-Room	16	K	D
11	Radiographic Test	3	G	J
12	Structural	20	D	I
13	Instrument Room	7	O	J
14	Equipment Panel	4	P	H, M
15	VFD Room	8	L	K, L, N
16	MC-Completion	10	R	O
17	Material And Equipment Procurement	5	B	P
18	Electrical	15	J	O
19	Preparation & Load Out	2	S	Q, R

Hasil perhitungan biaya *crash* per periode untuk setiap aktivitas dapat dilihat pada Tabel 4. Data yang digunakan dalam perhitungan tersebut adalah: waktu dan biaya normal aktivitas serta waktu dan biaya *crash* aktivitas. Berbagai data tersebut diperoleh melalui wawancara dengan pihak terkait. Proses perhitungan dilakukan menggunakan persamaan (1).

Seperti halnya pada proses pengumpulan data lainnya, hasil estimasi biaya tidak langsung juga diperoleh melalui wawancara dengan berbagai pihak terkait. Biaya tidak langsung dari proyek *Electrical House* dapat dilihat pada Tabel 5.

Pendekatan CPM digunakan untuk menentukan jalur kritis. Prosesnya dilakukan dalam 5 tahapan. Tahapan pertama adalah menggambarkan *Project network* dengan menggunakan pendekatan AoN. Notasi yang digunakan untuk menggambarkan node dapat dilihat pada Gambar 4. Tahapan kedua merupakan proses *Two-Pass*. Proses ini dilakukan dalam dua langkah, yaitu *Forward Pass* yang diikuti *Backward Pass*. *Forward Pass* dilakukan mulai dari aktivitas pertama sampai terakhir secara berurutan sesuai pola pada *Project Network*. Persamaan (2) digunakan dalam proses

perhitungan *Forward Pass*. *Backward Pass* baru dilakukan setelah proses *Forward Pass* selesai dilaksanakan. Berkebalikan dengan proses *Forward Pass*, *Backward Pass* dilakukan mulai dari aktivitas terakhir hingga aktivitas pertama secara berurutan sesuai pola pada *Project Network*. Persamaan (3) digunakan dalam proses perhitungan *Backward Pass*.

Project network yang telah dilengkapi dengan hasil dari proses *Two-Pass* dapat digunakan untuk melaksanakan tahap ketiga, yaitu menghitung waktu *slack*. Perhitungan waktu *slack* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (4) atau (5). Aktivitas kritis merupakan aktivitas yang memiliki waktu *slack* = 0. Jalur kritis terdiri atas rangkaian aktivitas kritis yang membentuk pola mulai dari aktivitas pertama hingga aktivitas terakhir dalam *project network*. Berdasarkan pemahaman ini, jalur kritis pada proyek produksi *Electrical House* oleh PT X adalah: Aktivitas A-B-C-D-J-K-O-R-S. Pada awal ini hanya terdapat satu jalur kritis pada *project network*. Tampilan dari *project network* beserta jalur kritis dapat dilihat pada Gambar 5. Jalur kritis ditandai dengan *arrow* tebal.

Tabel 4. Data Waktu Normal, Waktu *Crash*, Biaya Normal dan Biaya *Crash* Setiap Aktivitas Proyek *Electrical House*

Kode	Kegiatan	Waktu Normal	Biaya Normal	Waktu <i>Crash</i>	Biaya <i>Crash</i>
A	<i>Design Module</i>	3	\$ 20,00	1	\$ 30,00
N	<i>Air Lock Room</i>	9	\$ 873,00	5	\$ 950,00
I	<i>VFD</i>	10	\$ 657,00	6	\$ 750,00
H	<i>Architectural</i>	3	\$ 325,00	2	\$ 400,00
C	<i>Piping</i>	16	\$ 9.350,00	12	\$ 10.000,00
F	<i>Painting</i>	7	\$ 6.465,00	4	\$ 7.200,00
E	<i>Blasting</i>	8	\$ 7.435,00	5	\$ 8.200,00
M	<i>Battery Room</i>	6	\$ 7.556,00	3	\$ 8.555,00
Q	<i>HVAC</i>	5	\$ 3.654,00	3	\$ 4.500,00
K	<i>E-Room</i>	16	\$ 86.457,00	12	\$ 89.000,00
G	<i>Radiographic Test</i>	3	\$ 8.064,00	2	\$ 8.900,00
D	<i>Structural</i>	20	\$ 65.020,00	16	\$ 70.000,00
O	<i>Instrument Room</i>	7	\$ 73.674,00	4	\$ 80.000,00
P	<i>Equipment Panel</i>	4	\$ 873.874,00	2	\$ 885.000,00
L	<i>VFD Room</i>	8	\$ 923.758,00	5	\$ 950.000,00
R	<i>MC-Completion</i>	10	\$ 98.212,00	5	\$ 150.000,00
B	<i>Material And Equipment Procurement</i>	5	\$ 367.000,00	3	\$ 390.000,00
J	<i>Electrical</i>	15	\$ 746.722,00	11	\$ 820.000,00
S	<i>Preparation & Load Out</i>	2	\$ 923.748,00	1	\$ 995.000,00

Tabel 5. Biaya Tidak Langsung Proyek *Electrical House*

Estimasi Biaya Tidak Langsung Proyek	Estimasi Biaya Tidak Langsung per Hari
\$ 2.500,00	\$ 40,00

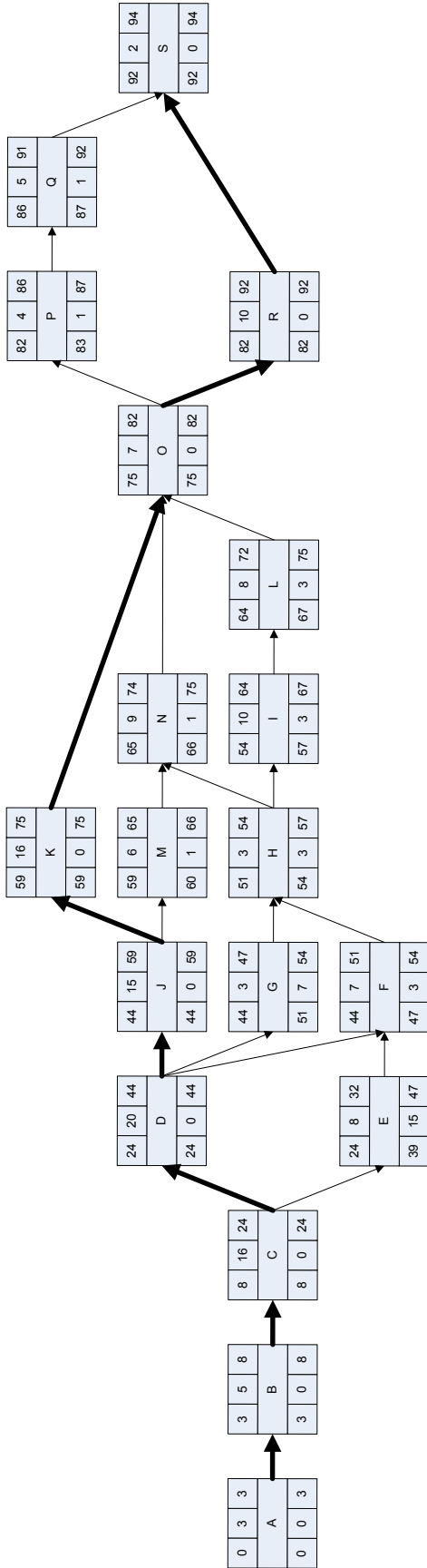
Early Start	Duration	Early Finish
Task Name		
Late Start	Slack	Late Finish

Gambar 4. Node Pada *Project Network*

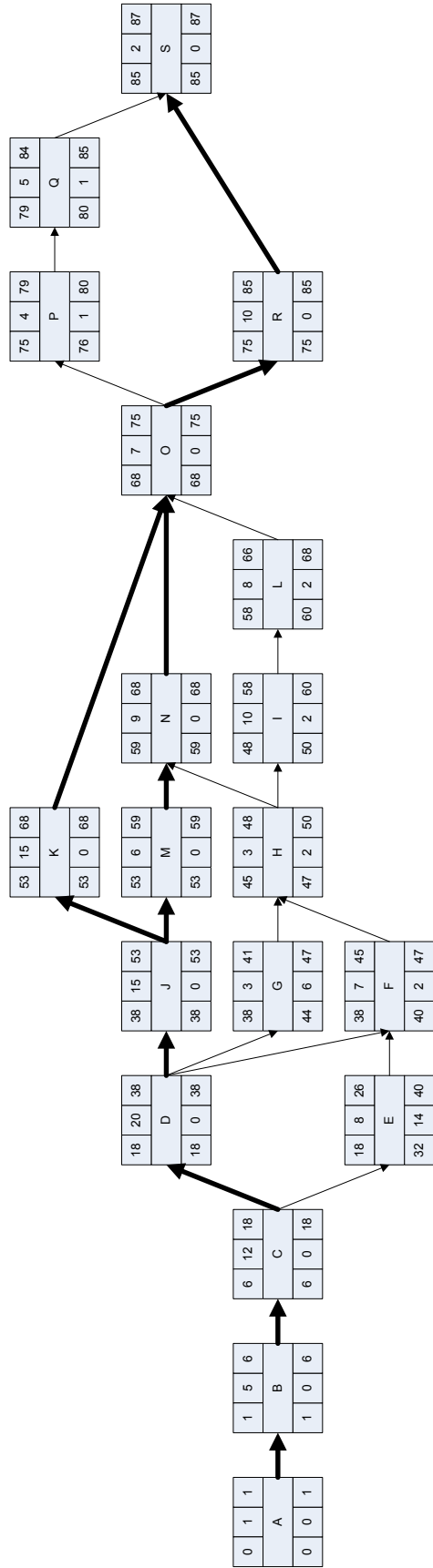
Setelah jalur kritis dapat diidentifikasi barulah analisis *crashing project* dapat dilakukan. Proses *crashing* diawali dengan menghitung biaya *crash* per periode untuk masing-masing aktivitas proyek. Biaya *crash* per periode dihitung menggunakan persamaan (1). Hasil perhitungan biaya *crash* per periode diurutkan dari nilai yang terkecil hingga terbesar dan ditampilkan pada Tabel 6.

Crashing dilakukan terhadap aktivitas kritis yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil. Hal ini bertujuan agar *crashing project* yang dilakukan efektif dan efisien. Pada kasus yang diselesaikan oleh penelitian

ini, *crashing project* dilakukan dengan tujuan untuk mempercepat durasi pelaksanaan proyek sebanyak 8 hari. Oleh karena pada awalnya hanya terdapat satu jalur kritis, maka proses *crashing* dilakukan seperti cara yang dikemukakan oleh Heizer dan Render [8]. Proses *crashing* untuk *project network* dengan satu jalur kritis berjalan sebanyak tujuh kali perulangan, sebelum pada akhirnya terjadi penambahan jalur kritis. *Project network* setelah *crashing* sebanyak tujuh kali perulangan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 3. Project Network pada Proyek Pembuatan E-House



Gambar 5. Project Network pada Proyek Pembuatan E-House setelah Tujuh kali Crashing

Tabel 6. Biaya *Crash* per Periode untuk Setiap Aktivitas yang telah diurutkan

Kode	Kegiatan	Waktu Normal	Biaya Normal	Waktu <i>Crash</i>	Biaya <i>Crash</i>	Biaya <i>Crash</i> per Periode
A	<i>Design Module</i>	3	\$ 20,00	1	\$ 30,00	\$ 5,00
N	<i>Air Lock Room</i>	9	\$ 873,00	5	\$ 950,00	\$ 19,25
I	<i>VFD</i>	10	\$ 657,00	6	\$ 750,00	\$ 23,25
H	<i>Architectural</i>	3	\$ 325,00	2	\$ 400,00	\$ 75,00
C	<i>Piping</i>	16	\$ 9.350,00	12	\$ 10.000,00	\$ 162,50
F	<i>Painting</i>	7	\$ 6.465,00	4	\$ 7.200,00	\$ 245,00
E	<i>Blasting</i>	8	\$ 7.435,00	5	\$ 8.200,00	\$ 255,00
M	<i>Battery Room</i>	6	\$ 7.556,00	3	\$ 8.555,00	\$ 333,00
Q	<i>HVAC</i>	5	\$ 3.654,00	3	\$ 4.500,00	\$ 423,00
K	<i>E-Room</i>	16	\$ 86.457,00	12	\$ 89.000,00	\$ 635,75
G	<i>Radiographic Test</i>	3	\$ 8.064,00	2	\$ 8.900,00	\$ 836,00
D	<i>Structural</i>	20	\$ 65.020,00	16	\$ 70.000,00	\$ 1.245,00
O	<i>Instrument Room</i>	7	\$ 73.674,00	4	\$ 80.000,00	\$ 2.108,67
P	<i>Equipment Panel</i>	4	\$ 873.874,00	2	\$ 885.000,00	\$ 5.563,00
L	<i>VFD Room</i>	8	\$ 923.758,00	5	\$ 950.000,00	\$ 8.747,33
R	<i>MC-Completion</i>	10	\$ 98.212,00	5	\$ 150.000,00	\$ 10.357,60
B	<i>Material And Equipment Procurement</i>	5	\$ 367.000,00	3	\$ 390.000,00	\$ 11.500,00
J	<i>Electrical</i>	15	\$ 746.722,00	11	\$ 820.000,00	\$ 18.319,50
S	<i>Preparation & Load Out</i>	2	\$ 923.748,00	1	\$ 995.000,00	\$ 71.252,00

4.2. Pengembangan Algoritma untuk Menentukan Biaya *Crashing* Minimum pada Project Network dengan Dua Jalur Kritis

Jenis algoritma yang dikembangkan dapat digolongkan ke dalam algoritma heuristik. Pengembangan algoritma dilakukan berdasarkan data dari kasus yang sedang dikaji. Segala kemungkinan aktivitas serta kombinasi aktivitas yang mampu memberikan biaya *crashing project* minimum akan dipertimbangkan melalui algoritma yang dikembangkan.

Algoritma usulan membutuhkan beberapa definisi baru terkait sifat dari masing-masing aktivitas kritis. Definisi baru tersebut antara lain:

- Aktivitas Pengikat, yaitu aktivitas kritis yang terdapat dalam seluruh jalur kritis pada *project network*.
- Aktivitas Lepas, yaitu aktivitas kritis yang hanya terdapat dalam satu jalur kritis saja.

Algoritma usulan bagi penentuan biaya *crashing* pada *project network* dengan dua jalur kritis adalah sebagai berikut:

Langkah 1

Membuat variabel X_{ij} ,

Dimana:

i = Kode aktivitas (A, B, ... Z)

j = Nomor jalur kritis (1, 2, ... n)

Untuk mempermudah analisis buatlah Tabel Analisis. Isi tabel melambangkan variabel-variabel X_{ij} . Format Tabel Analisis dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Format Tabel Analisis

	$i = A$	$i = B$...	$i = Z$
$j = 1$	X_{A1}	X_{B1}	...	X_{Z1}
$j = 2$	X_{A2}	X_{B2}	...	X_{Z2}
...
$j = n$	X_{An}	X_{Bn}	...	X_{Zn}

Identifikasi nilai variabel X_{ij} . Jika i adalah Aktivitas kritis maka nilai $X_{ij} = 1$, akan tetapi jika tidak kosongkan nilai X_{ij} .

Langkah 2

Mengelompokkan seluruh variabel X_{ij} dengan cara berikut:

- Jumlahkan nilai variabel X_{ij} pada masing-masing baris tabel analisis, kemudian atur ulang urutan baris tersebut. Baris yang memiliki total nilai tertinggi ditempatkan paling atas sementara baris yang memiliki total nilai terendah

- ditempatkan paling bawah.
- b. Jumlahkan nilai variabel X_{ij} pada masing-masing kolom tabel analisis, kemudian atur ulang urutan kolom tersebut. Kolom yang memiliki total nilai tertinggi ditempatkan pada urutan paling kiri sementara kolom dengan total nilai tertinggi ditempatkan pada urutan paling kanan.
 - c. Ulangi dari tahap a hingga urutan dari baris dan kolom tabel analisis tidak bisa lagi berubah.
 - d. Hapus kolom i yang tidak memiliki nilai pada seluruh j (aktivitas yang tidak menjadi bagian jalur kritis).
 - e. Kelompokkan seluruh aktivitas yang tersisa berdasarkan kriteria berikut:
 - Jika nilai $X_{ij} = 1$ untuk setiap j , maka kelompokkan aktivitas tersebut sebagai "Aktivitas Pengikat".
 - Jika nilai $X_{ij} = 1$ hanya pada satu j , maka kelompokkan aktivitas tersebut sebagai "Aktivitas Lepas".

Langkah 3

Tentukan biaya *crash* per periode untuk setiap "Aktivitas Pengikat". Identifikasi "Aktivitas Pengikat" yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil. Simpan hasil.

Langkah 4

Hapus "Aktivitas Pengikat" dari tabel analisis.

Langkah 5

Identifikasi "Aktivitas Lepas" yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil untuk setiap j .

Langkah 6

Jumlahkan seluruh "Aktivitas Lepas" yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil. Simpan hasil.

Langkah 7

Bandingkan hasil yang diperoleh pada Langkah 3 dengan hasil dari Langkah 6. Pilih hasil yang memiliki nilai minimum.

4.3. Penerapan Algoritma Usulan

Penerapan Algoritma usulan dilakukan pada lanjutan kasus *crashing project* pada produksi *Electrical House* PT X yang telah dijelaskan pada Bagian 4.1. Proses *Crashing* telah dilakukan sebanyak tujuh kali sehingga telah mempercepat rencana pelaksanaan selama 7 hari. Akan tetapi kondisi ini masih belum memenuhi tujuan, yaitu percepatan rencana pelaksanaan proyek sebanyak 8 hari. Oleh karena itu masih diperlukan satu kali proses *crashing* lagi.

Project network yang akan digunakan dalam proses *crashing* terakhir dapat dilihat sebelumnya pada Gambar 5. Mengingat bahwa terdapat dua jalur kritis dalam *project network* tersebut, maka algoritma usulan diterapkan untuk menyelesaikan persoalan ini. Kondisi terakhir dari tabel biaya *crash* per periode setelah tujuh kali proses *crashing* dapat dilihat pada Tabel 8.

Berdasarkan Tabel 8 dapat dilihat bahwa terdapat dua aktivitas yang barisnya ditandai dengan warna. Kedua aktivitas tersebut telah dipercepat pada proses-proses *crashing* sebelumnya sehingga mencapai batasannya. Secara sederhana, kedua aktivitas tersebut tidak bisa lagi dipercepat. Akan tetapi kedua aktivitas tersebut akan tetap diperlihatkan dalam proses analisis menggunakan algoritma usulan meskipun dianggap tidak ada dan tidak memiliki biaya *crashing*, sehingga tidak memungkinkan untuk terpilih oleh algoritma usulan.

Tabel 8. Kondisi Setelah Tujuh Kali Proses *Crashing*

Kode	Aktivitas	Waktu Normal	Biaya Normal	Waktu Crash	Biaya Crash	Biaya Crash per Periode
A	Design Module	1	\$ 20,00	1	\$ 30,00	
N	Air Lock Room	9	\$ 873,00	5	\$ 950,00	\$ 19,25
I	VFD	10	\$ 657,00	6	\$ 750,00	\$ 23,25
H	Architectural	3	\$ 325,00	2	\$ 400,00	\$ 75,00
C	Piping	12	\$ 9.350,00	12	\$ 10.000,00	
F	Painting	7	\$ 6.465,00	4	\$ 7.200,00	\$ 245,00
E	Blasting	8	\$ 7.435,00	5	\$ 8.200,00	\$ 255,00
M	Battery Room	6	\$ 7.556,00	3	\$ 8.555,00	\$ 333,00
Q	HVAC	5	\$ 3.654,00	3	\$ 4.500,00	\$ 423,00
K	E-Room	15	\$ 86.457,00	12	\$ 89.000,00	\$ 635,75
G	Radiographic Test	3	\$ 8.064,00	2	\$ 8.900,00	\$ 836,00
D	Structural	20	\$ 65.020,00	16	\$ 70.000,00	\$ 1.245,00
O	Instrument Room	7	\$ 73.674,00	4	\$ 80.000,00	\$ 2.108,67
P	Equipment Panel	4	\$ 873.874,00	2	\$ 885.000,00	\$ 5.563,00
L	VFD Room	8	\$ 923.758,00	5	\$ 950.000,00	\$ 8.747,33
R	MC-Completion	10	\$ 98.212,00	5	\$ 150.000,00	\$ 10.357,60
B	Material And Equipment Procurement	5	\$ 367.000,00	3	\$ 390.000,00	\$ 11.500,00
J	Electrical	15	\$ 746.722,00	11	\$ 820.000,00	\$ 18.319,50
S	Preparation & Load Out	2	\$ 923.748,00	1	\$ 995.000,00	\$ 71.252,00

Tabel 9 Tabel Analisis Awal

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Jalur Kritis 1	1	1	1	1						1	1				1			1	1
Jalur Kritis 2	1	1	1	1						1			1	1	1			1	1

Penerapan algoritma usulan akan dijelaskan sebagai berikut:

Langkah 1

Terdapat dua jalur kritis pada *project network*, yaitu: Aktivitas A-B-C-D-J-K-O-R-S dan Aktivitas A-B-C-D-J-M-N-O-R-S. Pendefinisian bagi setiap Variabel Xij dilakukan dengan bantuan tabel analisis. Tabel analisis awal dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 9.

Langkah 2

Permulaan dari Langkah 2 adalah menjumlahkan nilai variabel Xij pada setiap baris, kemudian mengurutkannya dari nilai total tertinggi sampai terendah. Setelah itu menjumlahkan nilai variabel Xij pada setiap kolom, kemudian mengurutkannya dari nilai total tertinggi sampai terendah. Langkah ini terus diulangi sampai urutan dari baris dan kolom tidak bisa lagi berubah. Rangkaian iterasinya dapat selengkapnya dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6 tersebut, pada Iterasi 1 Tahap 1 dapat dilihat bahwa Jalur Kritis 2 memiliki nilai total variabel Xij lebih besar dari Jalur Kritis 1 sehingga pada Iterasi 1 Tahap 2 urutan baris Jalur Kritis 2 dipindahkan ke atas baris Jalur Kritis 1. Konsep yang sama juga diterapkan pada hasil Iterasi 1 Tahap 2 sehingga terjadi pergeseran kolom pada Tabel Analisis, seperti yang dapat dilihat selengkapnya pada Hasil Iterasi 1.

Iterasi 2 mengulangi cara tersebut pada Hasil Iterasi 1 untuk melihat apakah masih terjadi pertukaran baris atau kolom. Hasil Pengolahan Iterasi 2 menunjukkan tidak terjadi pertukaran susunan baris maupun kolom, sehingga pengulangan Iterasi dihentikan. Selanjutnya kolom yang tidak memiliki nilai variabel Xij pada setiap barisnya dihapus dari Tabel Analisis. Bentuk Tabel Analisis setelah langkah 2 dapat dilihat pada Tabel 10.

Iterasi 1**Tahap 1**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	Total
Jalur Kritis 1	1	1	1	1						1	1				1			1	1	9
Jalur Kritis 2	1	1	1	1						1			1	1	1			1	1	10

Tahap 2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
Jalur Kritis 2	1	1	1	1						1			1	1	1				1	1
Jalur Kritis 1	1	1	1	1						1	1				1				1	1
Total	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	1	0	1	1	2	0	0	2	2	

Hasil Iterasi 1

	A	B	C	D	J	O	R	S	K	M	N	E	F	G	H	I	L	P	Q	
Jalur Kritis 2	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1									
Jalur Kritis 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											

Iterasi 2**Tahap 1**

	A	B	C	D	J	O	R	S	K	M	N	E	F	G	H	I	L	P	Q	Total
Jalur Kritis 2	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1									10
Jalur Kritis 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											9

Tahap 2

	A	B	C	D	J	O	R	S	K	M	N	E	F	G	H	I	L	P	Q	
Jalur Kritis 2	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1									
Jalur Kritis 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											
Total	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hasil Iterasi 2

	A	B	C	D	J	O	R	S	K	M	N	E	F	G	H	I	L	P	Q	
Jalur Kritis 2	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1									
Jalur Kritis 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1											

Gambar 6. Rangkaian Iterasi pada Langkah 2**Tabel 10.** Tabel Analisis Setelah Langkah 2

	A	B	C	D	J	O	R	S	K	M	N
Jalur Kritis 2	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1
Jalur Kritis 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		

Aktivitas yang memiliki nilai variabel Xij pada setiap baris dikelompokkan sebagai "Aktivitas Pengikat", sementara aktivitas yang hanya memiliki nilai variabel Xij pada salah satu baris dikelompokkan sebagai "Aktivitas Lepas". Hal ini merupakan tujuan dilakukannya Iterasi, yaitu untuk membagi aktivitas-aktivitas kritis yang ada ke dalam dua kelompok tersebut.

"Aktivitas Pengikat" antara lain: A, B, C, D, J, O, R dan S.

"Aktivitas Lepas" antara lain: K, M dan N.

Langkah 3

Tujuan utama langkah ini adalah untuk mengidentifikasi "Aktivitas Pengikat" yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil. Hasil identifikasi dapat dilihat pada Tabel 11. Berdasarkan Tabel 11 tersebut dapat dilihat bahwa "Aktivitas Pengikat" yang memiliki biaya *crash* per periode terkecil adalah Aktivitas D.

Tabel 11. Hasil Identifikasi "Aktivitas Pengikat" dengan Biaya *Crash* per Periode Terkecil

Aktivitas	Biaya <i>Crash</i> per Periode
A	
B	\$ 11.500,00
C	
D	\$ 1.245,00
J	\$ 18.319,50
O	\$ 2.108,67
R	\$ 10.357,60
S	\$ 71.252,00
Min	\$ 1.245,00

Langkah 4

Setelah "Aktivitas Pengikat" dengan biaya terkecil berhasil diidentifikasi maka seluruh "Aktivitas Pengikat" dihapus dari Tabel Analisis, sehingga menyebabkan hanya "Aktivitas Lepas" yang tersisa pada Tabel

Analisis. Pada kasus ini aktivitas yang tersisa adalah Aktivitas K, M dan N. Bentuk Tabel Analisis setelah Langkah 4 dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Tabel Analisis Setelah Langkah 4

	K	M	N
Jalur Kritis 2		1	1
Jalur Kritis 1	1		

Langkah 5

Tujuan langkah ini adalah untuk mengidentifikasi "Aktivitas Lepas" yang memiliki biaya crash per periode terkecil. Identifikasi dilakukan pada masing-masing jalur kritis. Hasil identifikasi dapat dilihat pada Tabel 13. Berdasarkan Tabel 13 tersebut Aktivitas yang memiliki biaya crash per periode terkecil untuk jalur kritis 1 adalah Aktivitas K, sementara untuk Jalur Kritis 2 adalah Aktivitas N.

Tabel 13. Hasil Identifikasi "Aktivitas Lepas" dengan Biaya *Crash* per Periode Terkecil

	K	M	N	Min
Jalur Kritis 2		\$333,00	\$ 19,25	\$ 19,25
Jalur Kritis 1	\$635,75			\$ 635,75

Langkah 6

Setelah "Aktivitas Lepas" berbiaya *crash* per periode terkecil untuk setiap jalur kritis telah berhasil diidentifikasi, maka jumlahkan biaya *crash* per periode aktivitas-aktivitas tersebut. Perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Total Biaya *Crash* per Periode seluruh "Aktivitas Lepas"

Aktivitas	Biaya <i>Crash</i> per Periode
K	\$ 635,75
N	\$ 19,25
Total	\$ 655,00

Langkah 7

Langkah terakhir ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan utama: Mana yang akan menghasilkan biaya *crash* minimum pada *project network* dengan dua jalur Kritis, mempercepat durasi pelaksanaan satu aktivitas yang terdapat pada kedua jalur kritis ("Aktivitas Pengikat")

atau mempercepat durasi pelaksanaan dua aktivitas yang masing-masingnya terdapat dalam jalur kritis berbeda ("Aktivitas Lepas")?

Untuk menjawab pertanyaan tersebut hasil dari Langkah 3 akan dibandingkan dengan hasil dari Langkah 6. Perbandingan tersebut diperlihatkan pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil Akhir Algoritma Usulan

	Mempercepat "Aktivitas Pengikat"	Mempercepat Dua "Aktivitas Lepas"
\$	1.245,00	\$ 655,00
Min		\$ 655,00

Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Tabel 15 dapat diambil kesimpulan bahwa biaya *crash* minimum akan tercapai apabila percepatan dilakukan pada dua "Aktivitas Lepas", yaitu Aktivitas K dan Aktivitas N. Oleh karena itu untuk proses *crashing project* kedelapan ini akan mempercepat durasi pelaksanaan Aktivitas K dan Aktivitas N masing-masing sebanyak 1 periode.

4.4. Estimasi Biaya Total Setelah Crashing Project

Tujuan penelitian adalah untuk mempercepat durasi pelaksanaan proyek produksi *Electrical House* yang dilaksanakan oleh PT X secara efektif dan efisien. Estimasi biaya langsung proyek dapat dilihat pada Tabel 16.

Estimasi biaya tidak langsung dilakukan berdasarkan informasi yang terdapat dalam

Tabel 5. Biaya tidak langsung pada dasarnya tidak tergantung pada volume pekerjaan tetapi pada jangka waktu pelaksanaan pekerjaan. Oleh karena itu semakin cepat waktu pelaksanaan proyek maka akan semakin rendah biaya tidak langsung yang harus dikeluarkan. Hasil estimasi biaya tidak langsung proyek setelah mengalami percepatan durasi pelaksanaan sebanyak 8 hari dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 16. Estimasi Biaya Langsung Setelah *Crashing Project*

Durasi Proyek	Aktivitas yang Dipercepat	Pengurangan Waktu (hari)	Biaya Crashing	Biaya Langsung Proyek
94	-	-	-	\$ 4.202.864,00
93	A	1	\$ 5,00	\$ 4.202.859,00
92	A	1	\$ 5,00	\$ 4.202.854,00
91	C	1	\$ 162,50	\$ 4.202.691,50
90	C	1	\$ 162,50	\$ 4.202.529,00
89	C	1	\$ 162,50	\$ 4.202.366,50
88	C	1	\$ 162,50	\$ 4.202.204,00
87	K	1	\$ 635,75	\$ 4.201.568,25
86	K dan N	1	\$ 655,00	\$ 4.200.913,25

* Baris yang diwarnai menandakan bahwa *crashing* untuk mencapai durasi tersebut dilakukan dengan menggunakan algoritma usulan

Tabel 17. Estimasi Biaya Tidak Langsung Setelah *Crashing Project*

Durasi Proyek	Pengurangan Biaya Tidak Langsung	Biaya Tidak Langsung Proyek
94	\$ -	\$ 2.500,00
93	\$ 40,00	\$ 2.460,00
92	\$ 40,00	\$ 2.420,00
91	\$ 40,00	\$ 2.380,00
90	\$ 40,00	\$ 2.340,00
89	\$ 40,00	\$ 2.300,00
88	\$ 40,00	\$ 2.260,00
87	\$ 40,00	\$ 2.220,00
86	\$ 40,00	\$ 2.180,00

Estimasi biaya total setelah *crashing project* dapat diketahui berdasarkan hasil pada Tabel 16 dan Tabel 17:

$$\begin{aligned} \text{Biaya Total} &= \text{Biaya Langsung Proyek} + \text{Biaya Tidak Langsung Proyek} \\ &= \$ 4.200.913,25 + \$ 2.180,00 \\ &= \mathbf{\$ 4.203.093,25} \end{aligned}$$

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Rencana percepatan pelaksanaan proyek *Electrical House* yang dikerjakan oleh PT X selama 8 hari telah berhasil disusun. Estimasi biaya total proyek setelah percepatan adalah \$ 4.203.093,25. Selain rencana percepatan, Algoritma heuristik baru untuk menentukan biaya *crashing* minimum pada *project network* dengan dua jalur kritis juga berhasil dikembangkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Yuliandra, *Manajemen Proyek: Sebuah Perspektif Teknik Industri*, Padang, Indonesia: Andalas University Press, 2015.
- [2] W. R. Duncan, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, USA: Project Management Institute, 1996.
- [3] V. Gaspersz, *Production Planning and Inventory Control Berdasarkan Pendekatan Sistem Terintegrasi MRP II dan JIT Menuju Manufaktur 21*, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 2004.
- [4] T. C. Davies, "The "Real" Success Factors on Projects", *International Journal of Project Management*, Vol. 20, pp. 185-190, 2002.
- [5] A. de Wit, "Measurement of Project Success", *Project Management*, Vol. 6, No. 3, pp. 164-170, 1988.
- [6] R. Atkinson, "Project Management: Cost, Time and Quality, Two Best Guesses and A Phenomenon, Its Time to Accept Other Success Criteria", *International Journal of Project Management*, Vol. 17, No. 6, pp. 337-342, 1999.
- [7] A. Gill, "An Effect-Cause-Effect Analysis of Project Objectives and Trade-Off Assumptions", *International Journal of Managing Projects in Business*, Vol. 1 No. 4, pp. 535-551, 2008.
- [8] J. Heizer dan B. Render, *Manajemen Operasi, edisi 7*, Penerjemah: D. Setyoningsih dan I. Almahdy, Jakarta: Penerbit Salemba Empat, 2006.
- [9] H. Thayer, *Management of the Hanford Engineer Works in World War II: How the Corps, DuPont, and the Metallurgical Laboratory Fast Tracked the Original Plutonium Works*. American Society of Civil Engineering Press, 1996.
- [10] M. Kareth, "Analisis Optimalisasi Waktu dan Biaya dengan Program Primavera 6.0", *Jurnal Sipil Statik*, Vol. 1, No. 1, pp. 54-57, 2012.