

Analisis Percepatan Menggunakan Metode *Crashing* pada Proyek Pekerjaan Struktur Pembangunan Rumah dan Klinik Bali

Marselinus Yanuar Poerba dan Retno Indryani

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)

e-mail: retno_i@ce.its.ac.id

Abstrak—Proyek konstruksi memiliki tiga batasan (*triple constraint*) yang terdiri dari anggaran, jadwal, dan mutu. Ketiga hal tersebut menjadi parameter penting yang sering dijadikan sebagai sasaran proyek bagi penyelenggara proyek. Namun, pelaksanaan proyek tidak selamanya sesuai dengan rencana, terdapat berbagai macam faktor yang membuat proyek menjadi bermasalah. Permasalahan pada proyek dapat mengakibatkan proyek mengalami keterlambatan (*delay*). Pelaksanaan Proyek Pekerjaan Struktur Pembangunan Rumah dan Klinik Bali direncanakan dapat diselesaikan dalam 51 minggu. Namun dikarenakan terdapat kendala saat proses pemancangan dan pengaruh cuaca, pada minggu 39 proyek mengalami keterlambatan sebesar 8,02%. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis percepatan menggunakan metode *crashing*. Analisis dilakukan pada minggu 40 dengan sisa durasi penyelesaian proyek sebesar 12 minggu (84 hari), untuk pekerjaan yang belum diselesaikan. Alternatif percepatan dilakukan dengan menggunakan penambahan jam kerja dan penambahan jumlah pekerja berdasarkan kondisi di lapangan. Setelah dilakukan percepatan, selanjutnya dilakukan analisis lama waktu yang berhasil dipercepat dan kebutuhan biaya percepatan untuk masing-masing alternatif. Hasil percepatan dari kedua alternatif tersebut dibandingkan dan dicari alternatif percepatan yang paling optimal. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja didapatkan durasi optimum pada iterasi 15 dengan durasi 84 hari dan biaya total Rp. 2.262.590.362. Sedangkan untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja didapatkan durasi optimum terjadi pada iterasi 22 dengan durasi 69 hari dan biaya total Rp. 2.159.768.425. Kedua alternatif bisa memenuhi sisa durasi penyelesaian proyek sebesar 84 hari. Namun alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja lebih optimal untuk dilakukan, dikarenakan menghasilkan biaya dan durasi yang lebih kecil daripada alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja.

Kata Kunci—Analisis Percepatan, *Crashing*, Optimasi.

I. PENDAHULUAN

PROYEK dapat diartikan sebagai suatu kegiatan yang dilakukan dengan waktu dan sumber daya terbatas untuk mencapai hasil akhir yang ditentukan [1]. Dalam proyek konstruksi terdapat tiga batasan yang dikenal dengan istilah *triple constraint* yang terdiri dari anggaran, jadwal, dan mutu yang sering dijadikan sebagai sasaran proyek. Namun, pelaksanaan proyek tidak selamanya sesuai dengan rencana, terdapat berbagai macam faktor yang membuat proyek menjadi bermasalah dan dapat mengakibatkan proyek mengalami keterlambatan (*delay*).

Keterlambatan merupakan sebagian waktu pelaksanaan yang tidak dapat dimanfaatkan sesuai dengan rencana, sehingga menyebabkan beberapa kegiatan yang mengikuti menjadi tertunda atau tidak dapat diselesaikan tepat sesuai

jadwal yang telah direncanakan [2]. Secara umum keterlambatan dapat disebabkan karena terjadinya perubahan desain, pengaruh cuaca, tidak terpenuhinya kebutuhan pekerja, material atau peralatan, kesalahan perencanaan atau spesifikasi, dan pengaruh keterlibatan pemilik proyek. Keterlambatan tersebut dapat menimbulkan kerugian berupa pembengkakan waktu dan biaya. Untuk mengatasi keterlambatan suatu proyek, maka dilakukan analisis percepatan dengan menggunakan metode *crashing*.

Crashing dapat diartikan sebagai suatu proses yang disengaja, sistematis, dan analitis dengan cara melakukan pengujian dari semua kegiatan dalam suatu proyek yang dipusatkan pada kegiatan yang berada pada jalur kritis [2]. Dengan menggunakan metode ini, dapat dihitung waktu maksimum suatu proyek dapat dipercepat dengan penambahan biaya yang paling minimum.

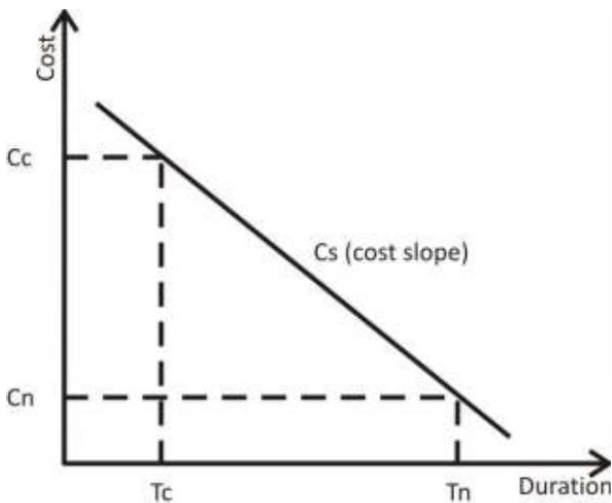
Metode ini akan diterapkan pada Proyek Pekerjaan Struktur Pembangunan Rumah dan Klinik Bali yang berlokasi di Gang Made, Sunset Road, Seminyak, Bali. Proyek tersebut dilaksanakan oleh PT. Tenda Artika. Pembangunan proyek terdiri dari pembangunan rumah 3 lantai dan klinik 5 lantai. Lingkup pekerjaan terdiri dari pekerjaan persiapan, pondasi, struktur, pasangan bata, plester, acian, dan plumbing. Proyek tersebut direncanakan dapat diselesaikan dalam 51 minggu (awal juni 2021 sampai akhir Mei 2022) dengan nilai kontrak sebesar Rp. 6.510.329.362. Namun berdasarkan laporan pencapaian progress pada akhir Februari 2022 (minggu 39), proyek mengalami keterlambatan sebesar 8,02% dengan nilai progress sebesar 58,59% dari 66,62%. Keterlambatan terjadi akibat terdapat kendala saat proses pemancangan dan pengaruh cuaca.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis percepatan dengan menggunakan alternatif penambahan jam kerja dan penambahan jumlah pekerja berdasarkan kondisi di lapangan. Setelah dilakukan percepatan, selanjutnya dilakukan analisis lama waktu yang berhasil dipercepat dan kebutuhan biaya percepatan untuk masing-masing alternatif. Hasil percepatan dari kedua alternatif tersebut dibandingkan dan dicari alternatif percepatan yang paling optimal.

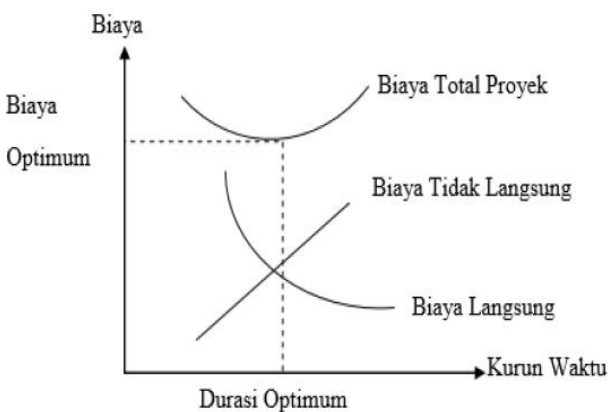
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Jenis-Jenis Biaya Proyek

Biaya dalam proyek konstruksi dibagi menjadi dua, yaitu biaya langsung (*direct cost*) dan biaya tidak langsung (*indirect cost*) [3]. Biaya langsung dapat dikelompokkan dalam beberapa jenis, yaitu: biaya material, upah buruh, dan biaya peralatan atau *equipments*. Biaya tidak langsung dapat



Gambar 2. Hubungan biaya – waktu pada keadaan normal dan *crash*.



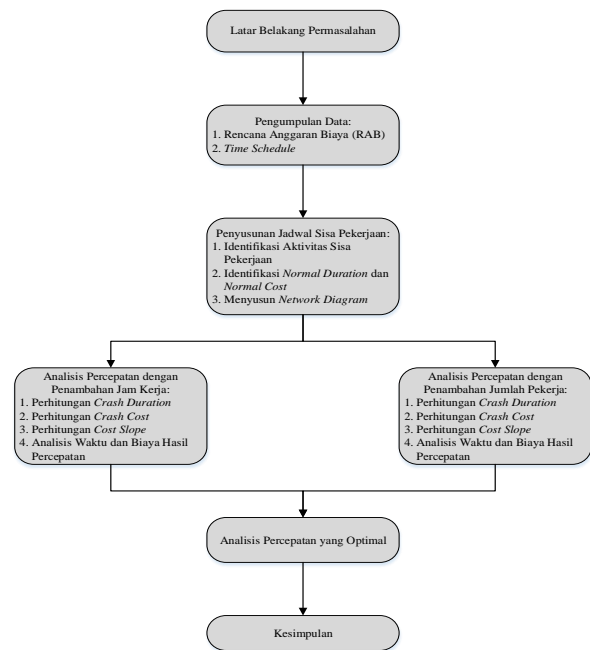
Gambar 3. Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya.

dikelompokkan dalam beberapa jenis, yaitu: biaya tak terduga atau *unexpected costs*, keuntungan atau *profit*, biaya *overhead* (pagar, penerangan, sewa kantor, gaji pegawai).

B. Hubungan Waktu dan Biaya Proyek

Hubungan biaya waktu pada keadaan normal dan *crash* dapat dilihat pada Gambar 1 [4]. Berdasarkan Gambar 1, pelaksanaan kegiatan pada kondisi normal dinamakan waktu normal (T_n). Sedangkan biaya pelaksanaan kegiatan pada kondisi normal dinamakan biaya normal (C_n). Penambahan tenaga kerja atau kerja lembur dapat mengurangi waktu normal. Namun penambahan tenaga kerja atau kerja lembur mengakibatkan penambahan biaya. Waktu normal T_n biasanya merupakan waktu terpanjang bagi suatu kegiatan sedangkan biaya normal C_n adalah biaya paling murah. Bila semua sumberdaya yang dimiliki dikerahkan sehingga suatu kegiatan bisa diselesaikan secepat mungkin, kegiatan tersebut dikatakan *crashed*. Kondisi *crashed* tidak hanya berhubungan dengan waktu tercepat, tetapi juga dengan biaya terbesar. Dalam kondisi *crashed* waktu pelaksanaan kegiatannya adalah T_c , biayanya C_c .

Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya dapat dilihat pada Gambar 2 [5]. Jika waktu penyelesaian suatu aktivitas dipercepat, menyebabkan biaya langsung akan bertambah sedangkan biaya tidak langsung akan berkurang. Biaya optimal merupakan biaya terendah yang didapatkan dari hasil penjumlahan biaya langsung dan biaya tidak langsung.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Konsep Penelitian

Konsep pada penelitian ini adalah penerapan optimasi waktu dan biaya pada Proyek Pekerjaan Struktur Pembangunan Rumah dan Klinik Bali dengan melakukan analisis percepatan menggunakan metode *crashing*. Analisis percepatan dilakukan dengan menggunakan alternatif penambahan jam kerja dan penambahan jumlah pekerja berdasarkan kondisi di lapangan. Penerapan analisis percepatan pada penelitian ini menggunakan tahapan-tahapan yang terdiri dari penyusunan jadwal sisa pekerjaan, analisis percepatan sesuai alternatif percepatan yang digunakan, dan analisis percepatan yang optimal.

Pada tahap penyusunan jadwal sisa pekerjaan terdiri dari kegiatan identifikasi aktivitas sisa pekerjaan yang bertujuan untuk melakukan identifikasi *normal duration* dan *normal cost*, dan diakhiri dengan menyusun *network diagram*. Pada tahap analisis percepatan sesuai alternatif percepatan yang digunakan dilakukan beberapa perhitungan seperti perhitungan produktivitas normal, produktivitas *crashing*, *crash duration*, *crash cost*, *cost slope*, dan diakhiri dengan proses iterasi. Pada tahap analisis percepatan yang optimal dilakukan dengan membandingkan durasi dan biaya hasil percepatan untuk alternatif penambahan jam kerja dan jumlah pekerja, kemudian dicari alternatif percepatan yang paling optimal.

B. Data Penelitian

Data-data yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Rencana anggaran biaya proyek, didasarkan pada analisis masing-masing komponen penyusun (material, upah, dan peralatan) untuk tiap-tiap item pekerjaan pada proyek. RAB digunakan untuk menentukan biaya normal yang dibuat sebagai acuan dalam menghitung biaya percepatan.

Tabel 1.
Pekerjaan yang berada di lintasan kritis

WBS Kode	Uraian Pekerjaan	Durasi
1.1.1.1	Balok Lantai 4	70 days
1.1.1.2	Pelat Lantai 4	49 days
1.1.1.3	Kolom Lantai 4	28 days
1.1.2.1	Balok Lantai 5	56 days
1.1.2.2	Pelat Lantai 5	35 days
1.1.2.3	Kolom Lantai 5	21 days
1.1.3.1	Balok Roof Top	35 days
1.1.3.2	Pelat Lantai Atap	28 days
3.1.1	Air Bekas, Kotor, dan Vent (Limbah)	56 days
3.1.2	Air Hujan	49 days
3.1.3	Test Komisioning	28 days

Tabel 2.
Total biaya proyek setelah dilakukan *crashing* untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja

Iterasi	Durasi	Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung	Total Biaya
0	119	2.082.306.948	181.641.368	2.263.948.31
1	113	2.082.984.531	168.666.985	2.251.651.51
2	112	2.083.741.818	166.504.587	2.250.246.40
3	110	2.087.486.198	162.179.793	2.249.665.99
4	108	2.091.733.630	157.854.998	2.249.588.62
5	106	2.096.136.747	153.530.204	2.249.666.95
6	101	2.107.194.603	142.718.218	2.249.912.82
7	100	2.109.472.562	140.555.820	2.250.028.38
8	98	2.114.885.497	136.231.026	2.251.116.52
9	96	2.120.401.601	131.906.231	2.252.307.83

2. *Time schedule*, diperlukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan dalam menyelesaikan proyek dan mengetahui jadwal masing-masing aktivitas pekerjaan di lapangan. *Schedule* proyek juga dipakai sebagai acuan durasi normal proyek.

C. Analisis Data

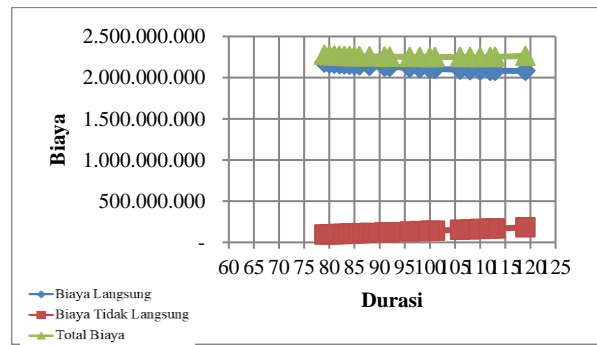
Data-data yang diperoleh tersebut selanjutnya dilakukan analisis data sebagai berikut:

1) Melakukan Identifikasi Aktivitas Sisa Pekerjaan

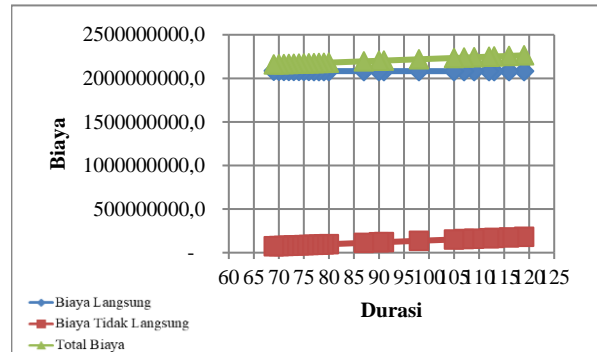
Dalam melakukan analisis percepatan diperlukan identifikasi aktivitas sisa pekerjaan untuk memperoleh waktu normal (*normal duration*) dan biaya normal (*normal cost*). Untuk menentukan waktu normal menggunakan data yang berasal dari data *time schedule* proyek. Sedangkan untuk menentukan biaya normal menggunakan data yang berasal dari data RAB proyek.

2) Menyusun Network Diagram

Setelah didapat waktu dan biaya normal, perlu dicari jalur kritis pada proyek. Pada jalur ini terletak kegiatan-kegiatan yang bila pelaksanaannya terlambat, akan menyebabkan keterlambatan penyelesaian keseluruhan proyek. Data penjadwalan yang didapatkan dari proyek biasanya berupa diagram balok atau kurva S. Untuk mendapatkan jalur kritis perlu dilakukan penyusunan *network diagram* berupa *Precedence Diagram Method* (PDM). Penyusunan *network diagram* dapat menggunakan bantuan *software* berdasarkan urutan pekerjaan yang diperoleh dari proyek.



Gambar 4. Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja.



Gambar 5. Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja.

3) Melakukan Analisis Percepatan Menggunakan Alternatif Percepatan

Pemilihan alternatif dilakukan dengan cara melakukan pertimbangan terhadap metode pelaksanaan konstruksi serta melakukan wawancara terkait situasi dan kondisi ruang aktual di lapangan. Opsi alternatif yang dilakukan adalah dengan menambah waktu pelaksanaan pekerjaan atau jam lembur dan menambah jumlah pekerja. Alternatif pertama menggunakan alternatif penambahan jam kerja. Alternatif kedua menggunakan alternatif penambahan jumlah pekerja.

4) Menentukan Crash Duration, Crash Cost, dan Cost Slope

Setelah memilih alternatif percepatan, dilanjutkan dengan menentukan *crash duration* dan *crash cost* masing-masing pekerjaan pada jalur kritis. Produktivitas *crashing* berbeda-beda sesuai dengan alternatif percepatan yang digunakan. Produktivitas *crashing* didapatkan dengan menambah produktivitas jam normal dengan produktivitas tambahan. *Crash duration* didapatkan dengan membagi volume pekerjaan dengan produktivitas *crashing* yang didapatkan. Sedangkan *crash cost* diperoleh dari harga satuan alternatif percepatannya per hari dikalikan dengan *crash duration*. Selanjutnya dilakukan perhitungan *cost slope* untuk masing-masing kegiatan.

5) Melakukan Iterasi

Setelah *cost slope* didapat, dilakukan kompresi pada aktivitas yang berada pada jalur kritis yang mempunyai nilai *cost slope* terendah. Kompresi terus dilakukan sampai jalur kritis mempunyai aktivitas-aktivitas yang telah jenuh seluruhnya sehingga sudah mengalami keadaan optimum. Setelah dilakukan analisis maka didapatkan *output* berupa waktu dan biaya proyek yang baru.

Tabel 3.

Total biaya proyek setelah dilakukan *crashing* untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja

Iterasi	Durasi	Biaya Langsung	Biaya Tidak Langsung	Total Biaya
0	119	2.082.306.948	181.641.368	2.263.948.316
1	116	2.082.306.948	175.154.176	2.257.461.124
2	113	2.082.306.948	168.666.985	2.250.973.932
3	112	2.082.306.948	166.504.587	2.248.811.535
4	109	2.082.306.948	160.017.396	2.242.324.343
5	107	2.082.306.948	155.692.601	2.237.999.549
6	105	2.082.306.948	151.367.807	2.233.674.755
7	98	2.082.490.931	136.231.026	2.218.721.957
8	91	2.082.674.914	121.094.245	2.203.769.160
9	90	2.082.701.198	118.931.848	2.201.633.046
10	87	2.082.787.106	112.444.656	2.195.231.762
11	80	2.083.109.627	97.307.876	2.180.417.502
12	79	2.083.195.207	95.145.478	2.178.340.685
13	78	2.083.293.619	92.983.081	2.176.276.700
14	77	2.083.502.121	90.820.684	2.174.322.805
15	76	2.083.749.099	88.658.287	2.172.407.386
16	75	2.084.012.898	86.495.889	2.170.508.787
17	74	2.084.329.009	84.333.492	2.168.662.501
18	73	2.084.673.588	82.171.095	2.166.844.683
19	72	2.085.018.167	80.008.698	2.165.026.864
20	71	2.085.375.064	77.846.301	2.163.221.364
21	70	2.085.788.413	75.683.903	2.161.472.316
22	69	2.086.246.918	73.521.506	2.159.768.425

6) Melakukan Evaluasi

Dari kedua alternatif yang digunakan, dipilih waktu dan biaya penyelesaian proyek yang optimum.

D. Tahapan Pengerjaan

Dalam melakukan analisis percepatan, diusahakan agar biaya yang ditimbulkan seminimal mungkin dan harus diperhatikan juga bahwa penekanan waktu aktivitas tersebut dilakukan pada aktivitas-aktivitas yang berada pada jalur kritis yang mempunyai *cost slope* terendah. Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan. Tahapan-tahapan penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penyusunan Jadwal Sisa Pekerjaan

Penyusunan jadwal sisa pekerjaan terdiri dari kegiatan identifikasi aktivitas sisa pekerjaan, dilanjutkan dengan melakukan identifikasi *normal duration* dan *normal cost*, dan diakhiri dengan menyusun *network diagram*.

1) Identifikasi Aktivitas Sisa Pekerjaan

Identifikasi aktivitas sisa pekerjaan dilakukan untuk mengetahui sisa pekerjaan yang belum terlaksana, yang nantinya akan dilakukan percepatan terhadap sisa pekerjaan proyek. Identifikasi sisa pekerjaan proyek dilakukan pada tanggal 1 Maret 2022 berdasarkan progres bulanan proyek. Pada identifikasi tanggal tersebut dapat disimpulkan bahwa pekerjaan yang tersisa adalah pekerjaan balok, pelat, dan kolom lantai 4; pekerjaan balok, pelat, dan kolom lantai 5; pekerjaan balok dan pelat atap; pekerjaan tangga beton; pekerjaan pasangan bata, plester, dan acian lantai 1-5; dan pekerjaan plumbing.

2) Identifikasi Normal Duration dan Normal Cost

Normal duration merupakan waktu untuk menyelesaikan suatu kegiatan dengan tingkat produktivitas normal. *Normal duration* didapatkan dari data penjadwalan rencana proyek konstruksi. Berdasarkan *schedule* proyek, diketahui bahwa proyek berlangsung selama 51 minggu dengan sisa waktu 12

minggu. *Normal cost* merupakan biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu kegiatan dengan durasi normal. *Normal cost* didapatkan dari data RAB proyek konstruksi. Berdasarkan RAB proyek, diketahui bahwa biaya langsung sebesar Rp. 5.146.505.425 dengan sisa biaya langsung sebesar Rp. 2.082.306.948.

3) Menyusun Network Diagram

Untuk menyusun *Network Diagram* didasarkan pada hubungan antar aktivitas. Dalam menentukan hubungan keterkaitan antar aktivitas didasarkan pada urutan pekerjaan di lapangan dan berdasarkan jadwal proyek yang telah ditetapkan. Setelah diketahui hubungan antar aktivitas dan durasi masing-masing aktivitas, selanjutnya dibuat jaringan kerja (*Network Diagram*) untuk mengidentifikasi lintasan kritis. Lintasan kritis merupakan lintasan yang memiliki durasi pengerjaan paling lama. Untuk memudahkan dalam penyusunan *network diagram* dan lintasan kritis, dapat dilakukan dengan bantuan *software*. Lintasan kritis pada aktivitas sisa pekerjaan proyek dapat dilihat pada Tabel 1. Dari hasil analisis diperoleh waktu untuk menyelesaikan sisa pekerjaan sebesar 119 hari.

B. Analisis Percepatan dengan Penambahan Jam Kerja

Penambahan jam kerja dimaksudkan untuk mendapatkan produktivitas harian yang lebih besar sehingga waktu penyelesaian menjadi lebih cepat. Jam kerja normal pada proyek adalah 8 jam (08.00-17.00). Untuk jam kerja lembur dilakukan selama 4 jam (18.00-22.00). Harga upah pekerja untuk lembur per jam sebesar dua kali upah pekerja per jam pada jam normal. Tingkat produktivitas kerja pada jam lembur sebesar 60% dari produktivitas kerja normal.

1) Perhitungan Crash Duration

Untuk melakukan perhitungan *crash duration*, diawali dengan melakukan perhitungan produktivitas normal dari aktivitas sisa pekerjaan. Produktivitas normal didapatkan dengan membagi volume aktivitas sisa pekerjaan dengan durasi normal. Data volume didapatkan dari data RAB sedangkan data durasi didapatkan dari data *time schedule*. Setelah didapatkan produktivitas normal, dilanjutkan dengan

perhitungan produktivitas *crashing* dengan cara menambahkan produktivitas normal dan produktivitas penambahan jam kerja. Produktivitas penambahan jam kerja per hari didapatkan dengan cara mengalikan produktivitas normal per jam dengan jam lembur dan efisiensi kerja lembur. *Crash duration* didapatkan dengan cara membagi volume aktivitas sisa pekerjaan dengan produktivitas *crashing*. Contoh perhitungan produktivitas normal untuk pekerjaan pembesian balok lantai 4:

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= 11.666,868 \text{ kg} && \text{(A)} \\ \text{Durasi} &= 35 \text{ hari} && \text{(B)} \\ \text{Produktivitas/hari} &= A / B && \text{(C)} \\ &= 11.666,868 / 35 \\ &= 333,339 \text{ kg} \\ \text{Produktivitas/jam} &= C / 8 \text{ jam} \\ &= 333,339 / 8 \\ &= 41,667 \text{ kg} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan produktivitas *crashing*/hari untuk pekerjaan pembesian balok lantai 4:

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= 11.666,868 \text{ kg} && \text{(A)} \\ \text{Produktivitas normal/jam} &= 41,667 \text{ kg} && \text{(B)} \\ \text{Efisiensi lembur} &= 60\% && \text{(C)} \\ \text{Produktivitas penambahan jam kerja/jam} &= B \times C && \text{(D)} \\ &= 41,667 \times 60\% \\ &= 25,000 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Produktivitas } \textit{crashing}/\text{hari} &= B \times 8 + D \times 4 \\ &= 41,667 \times 8 + 25,000 \times 4 \\ &= 433,341 \text{ kg} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan *crash duration* untuk pekerjaan pembesian balok lantai 4:

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= 11.666,868 \text{ kg} && \text{(A)} \\ \text{Produktivitas } \textit{crashing}/\text{hari} &= 433,341 \text{ kg} && \text{(B)} \\ \textit{Crash duration} &= A / B \\ &= 11.666,868 / 433,341 \\ &= 27 \text{ hari} \end{aligned}$$

2) Perhitungan Crash Cost

Untuk melakukan perhitungan *crash cost*, diawali dengan mencari harga satuan bahan dan upah pekerja per grup per hari yang didapatkan dari data RAB proyek. Setelah itu dilakukan perhitungan tambahan biaya langsung per hari akibat adanya penambahan jam kerja (lembur). *Crash cost* didapatkan dengan mengalikan harga satuan bahan dengan volume pekerjaan ditambah upah pekerja per grup per hari termasuk upah dari penambahan jam kerja per hari dikalikan dengan *crash duration*. Harga upah pekerja untuk lembur per jam sebesar dua kali upah pekerja per jam pada jam normal. Contoh perhitungan *crash cost* untuk pekerjaan pembesian balok lantai 4:

$$\begin{aligned} \text{Harga satuan bahan} &= \text{Rp. } 8.129 && \text{(A)} \\ \text{Volume} &= 11.666,868 \text{ kg} && \text{(B)} \\ \text{Upah pekerja/grup/hari} &= \text{Rp. } 1.161.285 && \text{(C)} \\ \text{Jam normal} &= 8 \text{ jam} && \text{(D)} \\ \text{Jam lembur} &= 4 \text{ jam} && \text{(E)} \\ \textit{Crash duration} &= 27 \text{ hari} && \text{(F)} \\ \text{Upah penambahan jam kerja/hari} &= 2 \times E / D \times C && \text{(G)} \\ &= 2 \times 4 / 8 \times 1.161.285 \\ &= \text{Rp. } 1.161.285 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textit{Crash cost} &= (A \times B) + ((C + G) \times F) \\ &= (8.129 \times 11.666,868) + ((1.161.285 + 1.161.285) \times 27) \end{aligned}$$

$$= \text{Rp. } 157.547.651$$

3) Perhitungan Cost Slope

Perhitungan *cost slope* didapatkan dengan membagi selisih antara *crash cost* dan *normal cost* dengan selisih antara *normal duration* dan *crash duration*. Contoh perhitungan *cost slope* untuk pekerjaan pembesian balok lantai 4:

$$\begin{aligned} \textit{Crash cost} &= \text{Rp. } 157.547.651 && \text{(A)} \\ \textit{Normal cost} &= \text{Rp. } 135.483.238 && \text{(B)} \\ \textit{Normal duration} &= 35 && \text{(C)} \\ \textit{Crash duration} &= 27 && \text{(D)} \\ \textit{Cost slope} &= \frac{(A-B)}{(C-D)} \\ &= \text{Rp. } 2.758.052 \end{aligned}$$

4) Analisis Waktu dan Biaya Hasil Percepatan

Proses iterasi dilakukan untuk mengkompresi pekerjaan pada aktivitas kritis. Proses iterasi dilakukan terlebih dahulu pada aktivitas yang memiliki *cost slope* terendah. Jika terdapat lebih dari satu lintasan kritis, maka dilakukan iterasi pada aktivitas yang mempengaruhi semua lintasan kritis. Iterasi dilakukan dengan syarat lintasan kritis tidak boleh memiliki durasi lebih kecil dari lintasan lain. Proses iterasi dihentikan jika lintasan kritis tidak dapat dipercepat lagi atau jenuh. Perhitungan durasi akibat *crashing* dilakukan dengan mengurangi durasi normal dengan waktu percepatan. Terdapat beberapa proses iterasi yang dilakukan:

Pertama iterasi 1, pengurangan durasi dilakukan pada aktivitas kritis dengan *cost slope* terkecil yang mempengaruhi lintasan kritis. Pengurangan durasi sebesar 6 hari pada pekerjaan test komisioning dengan nilai *cost slope* Rp. 112.931. Hasil kompresi pada iterasi 1 menyebabkan perubahan durasi menjadi 113 hari.

Selanjutnya iterasi 2, pengurangan durasi sebesar 1 hari pada pekerjaan bak kontrol & sumur resapan dengan nilai *cost slope* Rp. 757.286. Hasil kompresi pada iterasi 2 menyebabkan perubahan durasi menjadi 112 hari.

Iterasi 3 yaitu pengurangan durasi sebesar 2 hari pada pekerjaan bak kontrol & sumur resapan dan pasangan dinding lantai 2 dengan nilai *cost slope* total Rp.1.872.190. Hasil kompresi pada iterasi 3 menyebabkan perubahan durasi menjadi 110 hari.

Iterasi dilanjutkan sampai iterasi 20, yaitu pengurangan durasi sebesar 1 hari pada pekerjaan pembesian balok lantai 5, pasangan dinding lantai 3, dan bekisting tangga lantai 1 dengan nilai *cost slope* total Rp. 6.958.483. Hasil kompresi pada iterasi 20 menyebabkan perubahan durasi menjadi 79 hari.

Dengan dilakukannya *crashing*, maka biaya langsung pada proyek akan bertambah sedangkan biaya tidak langsung akan berkurang. Perhitungan total biaya akibat *crashing* dilakukan dengan menambahkan biaya langsung dengan biaya percepatan (*cost slope* per hari dikalikan dengan waktu percepatan) kemudian ditambah biaya tidak langsung per hari yang telah dikurangi sesuai waktu percepatan. Biaya langsung sisa proyek, yaitu sebesar Rp. 2.082.306.948. Biaya langsung tersebut akan bertambah sebesar jumlah hari percepatan dikalikan *cost slope* dari aktivitas yang dipercepat. Berdasarkan data RAB, sisa biaya tidak langsung sebesar Rp. 181.641.368 atau sebesar Rp. 2.162.397 per hari (15% dari total biaya proyek). Biaya tidak langsung total akan dikurangi dengan biaya tidak langsung per hari dikalikan

dengan jumlah hari percepatan. Contoh perhitungan pada iterasi 1:

$$\text{Biaya langsung sisa} = \text{Rp. } 2.082.306.948 \quad (\text{A})$$

$$\text{Biaya tidak langsung sisa} = \text{Rp. } 181.641.368 \quad (\text{B})$$

$$\text{Biaya tidak langsung per hari} = \text{Rp. } 2.162.397 \quad (\text{C})$$

$$\text{Durasi } \textit{crashing} = 6 \quad (\text{D})$$

$$\text{Cost slope} = \text{Rp. } 112.931 \quad (\text{E})$$

$$\text{Biaya langsung} = \text{A} + \text{E} \times \text{D} \quad (\text{F})$$

$$= 2.082.306.948 + 112.931 \times 6$$

$$= \text{Rp. } 2.082.984.531$$

$$\text{Biaya tidak langsung} = \text{B} - \text{C} \times \text{D} \quad (\text{G})$$

$$= 181.641.368 - 2.162.397 \times 6$$

$$= \text{Rp. } 168.666.985$$

$$\text{Total biaya} = \text{F} + \text{G}$$

$$= 2.082.984.531 + 168.666.985$$

$$= \text{Rp. } 2.251.651.516$$

Total biaya proyek setelah dilakukan *crashing* untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 diketahui bahwa durasi optimum terjadi pada iterasi 15 dengan durasi 84 hari dan biaya total Rp. 2.262.590.362.

C. Analisis Percepatan dengan Penambahan Jumlah Pekerja

Menggunakan cara yang sama seperti alternatif penambahan jam kerja. Total biaya proyek setelah dilakukan *crashing* untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 diketahui bahwa durasi optimum terjadi pada iterasi 22 dengan durasi 69 hari dan biaya total Rp. 2.159.768.425.

D. Analisis Percepatan yang Optimal

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan hasil bahwa untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja, durasi optimum terjadi pada iterasi 15 dengan durasi 84 hari dan biaya total Rp. 2.262.590.362. Sedangkan untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja, durasi optimum terjadi pada iterasi 22 dengan durasi 69 hari dan biaya total Rp. 2.159.768.425. Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja dapat dilihat pada Gambar 4. Hubungan waktu, biaya langsung, biaya tidak langsung, dan total biaya untuk alternatif

percepatan dengan penambahan jumlah pekerja dapat dilihat pada Gambar 5.

Dari segi waktu, kedua alternatif percepatan bisa memenuhi sisa durasi proyek yaitu sebesar 84 hari, namun alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja menghasilkan durasi penyelesaian yang lebih pendek yaitu 69 hari. Dari segi biaya, alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja juga membutuhkan total biaya yang lebih kecil daripada alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja. Berdasarkan kondisi tersebut, alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja lebih optimal untuk dilakukan karena membutuhkan biaya dan durasi yang lebih kecil daripada alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja.

V. KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan perhitungan yang dilakukan pada Proyek Pekerjaan Struktur Pembangunan Rumah dan Klinik Bali dapat diambil kesimpulan.

Untuk alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja didapatkan durasi optimum pada iterasi 15 dengan durasi 84 hari dan biaya total Rp. 2.262.590.362. Sedangkan untuk alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja didapatkan durasi optimum terjadi pada iterasi 22 dengan durasi 69 hari dan biaya total Rp. 2.159.768.425.

Kedua alternatif bisa memenuhi sisa durasi penyelesaian proyek sebesar 84 hari. Namun alternatif percepatan dengan penambahan jumlah pekerja lebih optimal untuk dilakukan, dikarenakan menghasilkan biaya dan durasi yang lebih kecil daripada alternatif percepatan dengan penambahan jam kerja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. I. Ervianto, *Manajemen Proyek Konstruksi*. Yogyakarta: Andi, 2005.
- [2] W. I. Ervianto, *Teori Aplikasi Manajemen Proyek Konstruksi*. Yogyakarta: Andi, 2004.
- [3] A. Nurdiana, "Analisis biaya tidak langsung pada proyek pembangunan best western star hotel & star apartment semarang," *Teknik*, vol. 36, no. 2, pp. 105--109, 2015.
- [4] S. Hamidullah and C. Kumar, "Time and cost optimisation in project execution," *IJARIE*, vol. 3, no. 4, 2017.
- [5] M. Priyo and M. R. A. Paridi, "Studi optimasi waktu dan biaya dengan metode time cost trade off pada proyek konstruksi pembangunan gedung olah raga (GOR)," *Semesta Tek.*, vol. 21, no. 1, pp. 72--84, 2018.