

PENERAPAN *LINE OF BALANCE* DENGAN TARGET WAKTU PENYELESAIAN PROYEK UNTUK OPTIMASI PENJADWALAN PROYEK RUMAH TINGGAL

Sean Adrian Lythio¹ dan Onnyxiforus Gondokusumo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
sean.325180156@stu.untar.ac.id

²Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
onnyxiforusg@ft.untar.ac.id

Masuk: 19-07-2022, revisi: 19-08-2022, diterima untuk diterbitkan: 31-08-2022

ABSTRACT

Scheduling is one of the most important and determines the success of a project, including construction projects that are repetitive. Choosing the right scheduling method based on project characteristic can increase the efficiency of the project itself, both in terms of cost and time. This study will examine the application of the optimization of Line of Balance (LoB) scheduling using the deadline completion target. This optimization is applied with the concept of linear programming, by entering some several linear constraints, such as start time in the first and last unit, deadlines completion target, and using the linear objective function to minimizing the crew employment cost for each activity, such that the crews and workers employed can be minimize. This study use a housing project in East Jakarta with a total of 10 housing units. The result of this optimization shows that a total of 37 crews and 164 workers were employed for this project. Those result are smaller than the existing method have done, which was 39 crews and 172 workers were employed for this project. The results show that using the objective function to minimizing the crew employment cost can reduce the amount of crews and workers employed.

Keywords: Line of Balance; repetitive project; deadline completion target; linear programming; objective function

ABSTRAK

Penjadwalan merupakan salah satu hal yang sangat penting dan menentukan keberhasilan suatu proyek, termasuk proyek konstruksi yang bersifat berulang (repetitif). Pemilihan metode penjadwalan yang sesuai dengan sifat dari suatu proyek dapat menambah efisiensi dari suatu proyek, baik itu dari segi biaya dan waktu. Penelitian ini akan mengkaji penerapan optimasi penjadwalan *Line of Balance* (LoB) dengan target waktu penyelesaian proyek. Optimasi ini diterapkan dengan konsep pemrograman linier, yaitu dengan cara memasukkan beberapa batasan linier, seperti hubungan keterkaitan antara waktu mulai untuk unit pertama dan terakhir, target waktu penyelesaian proyek, dan menggunakan fungsi objektif linier untuk memperkecil jumlah biaya yang dikeluarkan untuk setiap kegiatan, sehingga jumlah *crew* dan pekerja yang dipekerjakan dapat menjadi lebih sedikit. Penelitian ini menggunakan proyek rumah tinggal di Jakarta Timur untuk dijadikan objek penelitian dengan jumlah unit sebanyak 10 unit rumah. Hasil dari optimasi ini menunjukkan sebanyak 37 *crew* dan 164 pekerja dapat dipekerjakan. Hasil tersebut lebih sedikit jika menggunakan metode optimasi yang telah ada sebelumnya, yaitu sebanyak 39 *crew* dan 172 pekerja dapat dipekerjakan. Hal ini membuktikan bahwa dengan menggunakan fungsi objektif memperkecil jumlah biaya dapat mengurangi jumlah *crew* serta pekerja yang dipekerjakan.

Kata kunci: *Line of Balance*; proyek repetitif; target waktu penyelesaian proyek; pemrograman linier; fungsi objektif

1. PENDAHULUAN

Populasi penduduk Indonesia yang terus bertumbuh dari tahun ke tahun, membuat berbagai proyek konstruksi terus bertumbuh pula (Andriani et al., 2018). Hal tersebut berdampak pada pekerjaan-pekerjaan yang dilakukan pada setiap proyek konstruksi yang semakin bervariasi dan menjadi lebih kompleks. Agar pekerjaan-pekerjaan pada proyek konstruksi tersebut dapat dikelola dan dilaksanakan dengan baik, maka diperlukan suatu manajemen yang baik. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan pembuatan penjadwalan proyek yang baik dan benar.

Seiring dengan berjalannya waktu, kita sering menemukan proyek konstruksi yang melakukan pekerjaan-pekerjaan yang sama dan berkelanjutan pada suatu proyek. Biasanya, proyek tersebut disebut juga dengan proyek yang bersifat berulang (repetitif) (Sanjaya, 2012). Proyek yang bersifat berulang (repetitif) ini biasanya terdiri atas beberapa aktivitas yang sama untuk setiap unit. Beberapa proyek yang termasuk kategori ini seperti proyek rumah tinggal, ruas-ruas jalan pada proyek jalan raya, dan sebagainya. (Sanjaya, 2012). Pada proyek-proyek tersebut, setiap regu kerja

(*crew*) harus menyelesaikan beberapa aktivitas yang sama di beberapa unit. Oleh karena itu, keberlanjutan dari setiap *crew* harus terjaga agar nantinya tidak ada *crew* yang harus menunggu suatu kegiatan selesai terlebih dahulu. (Long & Ohsato, 2009). *Crew* yang bekerja secara keberlanjutan akan memperkecil waktu dan biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan seluruh unit yang tersedia (Arditi et al., 2001). Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan dalam penjadwalan proyek. Setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda. Akan tetapi, untuk pekerjaan repetitif seperti proyek rumah tinggal, metode *Line of Balance* merupakan metode yang paling cocok (Aulia et al., 2016). *Line of Balance* adalah sebuah metode penjadwalan untuk proyek repetitif yang terdiri dari garis yang menggambarkan unit pekerjaan pada sumbu vertikal dan waktu pada sumbu horizontal (Aulia et al., 2016).

Pada penjadwalan *Line of Balance* pada umumnya, durasi proyek diketahui dengan cara mendistribusikan sejumlah *crew* pada setiap kegiatan. Pada beberapa kondisi, suatu proyek seringkali dihadapkan dengan berbagai kendala, salah satunya adalah mengenai target waktu yang ditetapkan menjadi lebih pendek atau spesifik. Dalam penelitian ini, akan dibahas mengenai optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek. Optimasi ini dilakukan dengan 2 tahap, yaitu dengan uji kelayakan (*feasibility test*) yang bertujuan untuk memeriksa apakah proyek dengan target waktu yang telah ditetapkan dapat dilakukan optimasi dan optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*) dengan membuat pemodelan optimasi yang terdiri dari fungsi objektif linier (*linear objective function*) memperkecil jumlah biaya dan batasan linier (*linear constraints*) yang berupa keterkaitan antara waktu kegiatan pada unit pertama dan terakhir serta target waktu yang telah ditetapkan. Biaya pada penelitian ini diasumsikan dengan jumlah pekerja yang bekerja untuk setiap kegiatan dan biaya pekerja untuk setiap kegiatan adalah sama. Hasil dari optimasi ini akan dibandingkan dengan penelitian yang sebelumnya telah ada, yaitu dengan *linear objective function* memperkecil jumlah *crew*, tanpa memperhatikan jumlah pekerja pada setiap kegiatan.

Berdasarkan uraian kendala yang telah dijelaskan, maka didapat rumusan masalah yang dapat diterapkan pada penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana penerapan optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek pada proyek rumah tinggal?
2. Bagaimana total *crew* dan pekerja pada optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan fungsi objektif memperkecil jumlah *crew* dan memperkecil jumlah biaya?
3. Bagaimana keunggulan serta kendala yang dihadapi dalam penerapan optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek?

Berdasarkan rumusan masalah yang tertera, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memahami penerapan optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek pada proyek rumah tinggal.
2. Membandingkan total *crew* pada optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan fungsi objektif memperkecil jumlah *crew* dan memperkecil jumlah biaya.
3. Mengidentifikasi keunggulan serta kendala dalam penerapan optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek.

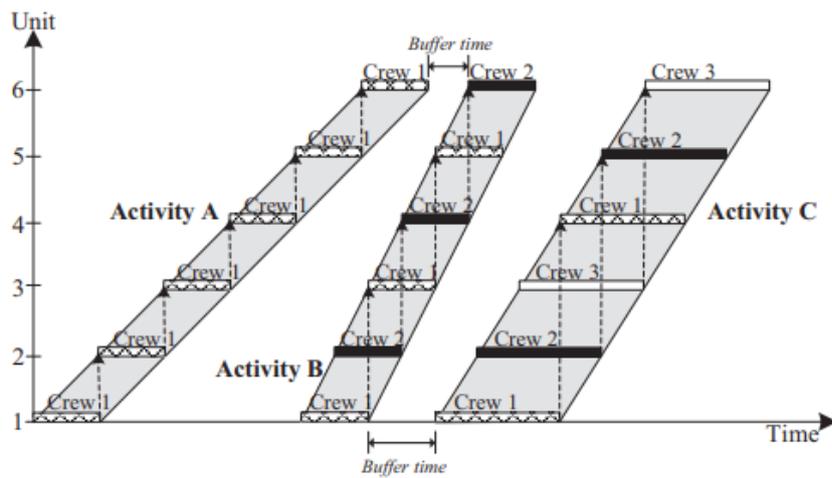
Line of balance

Line of Balance (LoB) merupakan metode penjadwalan proyek yang ditujukan untuk perencanaan proyek yang memiliki kegiatan-kegiatan yang berulang (repetitif), seperti terowongan, jaringan pipa, gedung bertingkat, rumah tinggal, dan jalan raya (Tokdemir et al., 2019). Untuk proyek dengan jumlah kegiatan relatif sedikit dengan kegiatan yang berulang, metode ini sangat efektif untuk digunakan (Sanjaya, 2012).

Line of Balance (LoB) adalah metode penjadwalan menggunakan sumbu koordinat, yaitu absis dan ordinat, absis atau sumbu horizontal menunjukkan waktu kerja dan ordinat atau sumbu vertikal menunjukkan jumlah unit pekerjaan. Sedangkan garis miring menyatakan jenis kegiatan sekaligus menunjukkan kecepatan dari kegiatan tersebut. Kemiringan dari setiap garis alir kegiatan menunjukkan tingkat produktivitas dari kegiatan tersebut. Semakin tegak garis alir tersebut maka semakin tinggi tingkat produktivitasnya, seperti yang disajikan pada Gambar 1.

Line of Balance (LoB) merupakan metode penjadwalan proyek yang ditujukan untuk perencanaan proyek yang memiliki kegiatan-kegiatan yang berulang (repetitif). Untuk proyek dengan jumlah kegiatan relatif sedikit dengan kegiatan yang berulang, metode ini sangat efektif untuk digunakan.

LoB juga berfungsi sebagai media *control* dan *monitoring*, karena bisa digunakan untuk menunjukkan jumlah pekerjaan yang sudah selesai dalam kurun waktu tertentu, sehingga tingkat produksi bisa selalu dikontrol apakah sesuai dengan rencana awal. Terdapat 2 tahap metode optimasi penjadwalan *Line of Balance* pada penelitian ini. Kedua tahap tersebut yakni uji kelayakan (*feasibility test*) dan optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*).



Gambar 1. Grafik penjadwalan LoB (Zou et al., 2018).

Uji kelayakan (*feasibility test*)

Feasibility test dilakukan dengan tujuan untuk memastikan agar target waktu yang telah ditetapkan dapat tercapai dan proyek dapat dinyatakan layak (*feasible*), sehingga dapat dilakukan optimasi. *Feasibility test* dilakukan dengan cara menentukan durasi proyek tercepat ‘*Shortest Project Duration*’ (SPD) dan membandingkannya dengan target waktu yang telah ditetapkan (δ). Suatu proyek dapat dinyatakan layak apabila target waktu yang diberikan lebih besar sama dengan durasi proyek tercepat. Durasi proyek tercepat dapat ditentukan dengan menentukan nilai $ES_{jk_j}^1$ dan $ES_{jk_j}^m$ yang merupakan waktu mulai tercepat untuk setiap kegiatan, baik itu di unit pertama dan terakhir tahap-tahap dalam menentukan nilai $ES_{jk_j}^1$ dan $ES_{jk_j}^m$ dapat terlihat pada Persamaan 1 – 5 (Zou et al., 2018).

$$R_{jk_j} = \begin{cases} \frac{k_j}{d_j}; & j \in A \{0, n+1\} \\ \pm\infty; & j=0 \text{ atau } n+1 \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{j,k_j}^1(p,k_p) = \begin{cases} ES_{pk_p}^1 + d_p; & \text{jika } R_{pk_p} \geq R_{jk_j} \\ t_{j,k_j}^m(p,k_p) - (m-1)\frac{d_j}{k_j}; & \text{jika } R_{pk_p} < R_{jk_j} \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{j,k_j}^m(p,k_p) = \begin{cases} t_{j,k_j}^1(p,k_p) + (m-1)\frac{d_j}{k_j}; & \text{jika } R_{pk_p} \geq R_{jk_j} \\ ES_{pk_p}^m + d_p; & \text{jika } R_{pk_p} < R_{jk_j} \end{cases} \quad (3)$$

$$ES_{jk_j}^1 = \max_{p \in P_j} \left\{ \min_{1 \leq k_p \leq \bar{k}_p} \left\{ t_{j,k_j}^1(p,k_p) \right\} \right\} \quad (4)$$

$$ES_{jk_j}^m = ES_{jk_j}^1 + \frac{m-1}{R_{jk_j}} \quad (5)$$

dengan R_{jk_j} = *progress* kegiatan j ketika *crew* yang bekerja sebanyak k_j , d_p = durasi kegiatan pendahulu (*predecessor*), d_j = durasi kegiatan j , k_j = jumlah kru yang bekerja pada kegiatan j , $t_{j,k_j}^1(p,k_p)$ = waktu tercepat untuk memulai kegiatan j pada unit pertama jika *crew* yang bekerja sebesar k_j , $t_{j,k_j}^m(p,k_p)$ = waktu tercepat untuk memulai kegiatan j pada unit ke m jika *crew* yang bekerja sebesar k_j , $ES_{jk_j}^1$ = waktu tercepat untuk memulai kegiatan j jika jumlah *crew* yang bekerja sebanyak k_j pada pekerjaan unit pertama, dan $ES_{jk_j}^m$ = waktu tercepat untuk memulai kegiatan j jika *crew* yang dipekerjakan sebesar k_j pada unit ke m .

Dengan demikian, maka nilai SPD dapat ditentukan dengan Persamaan 6 (Zou et al, 2018).

$$SPD = ES_{n+1,1}^m \quad (6)$$

dengan $ES_{n+1,1}^m$ = waktu mulai kegiatan $n+1$ pada unit terakhir, dapat ditentukan dengan menjumlahkan waktu mulai kegiatan n pada unit terakhir dengan durasi dari kegiatan n .

Setelah proyek dinyatakan layak, maka proyek tersebut dapat dilakukan optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*).

Optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*)

Optimasi penjadwalan pada penelitian ini menggunakan prinsip pemrograman linier (*linear programming*), yaitu dengan membentuk pemodelan batasan linier (*linear constraints*) dan fungsi objektif linier (*linear objective function*) yang dapat menjadi kunci untuk menghasilkan solusi atas permasalahan optimasi penjadwalan dengan batasan waktu tertentu. Penelitian ini menggunakan fungsi objektif memperkecil jumlah biaya. Biaya diasumsikan dengan jumlah pekerja yang bekerja untuk setiap kegiatan. Fungsi objektif tersebut dapat ditulis pada Persamaan 7 dan 8 (Zou et al., 2018).

$$\min \sum_{j \in A} \sum_{k=1}^{\bar{k}_j} \lambda_{jk} x_{jk} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{\bar{k}_j} x_{jk} = 1 \quad (8)$$

dengan λ_{jk} = biaya kegiatan j ketika *crew* sebanyak k bekerja

Dalam penjadwalan LoB jika progres atau tingkat kemajuan kegiatan j kurang dari kegiatan *predecessor* p , maka hubungan keterkaitan antar kedua kegiatan ini dapat terpenuhi dengan cara mempertahankan tingkat kemajuannya pada saat pembangunan unit pertama. Selain itu, maka pembangunan pada unit terakhir harus dipertimbangkan lebih lanjut. Berdasarkan asumsi bahwa jeda waktu antar kegiatan sama dengan 0, maka batasan yang dimaksud dapat ditulis dalam Persamaan 9 dan 10 (Zou et al., 2018).

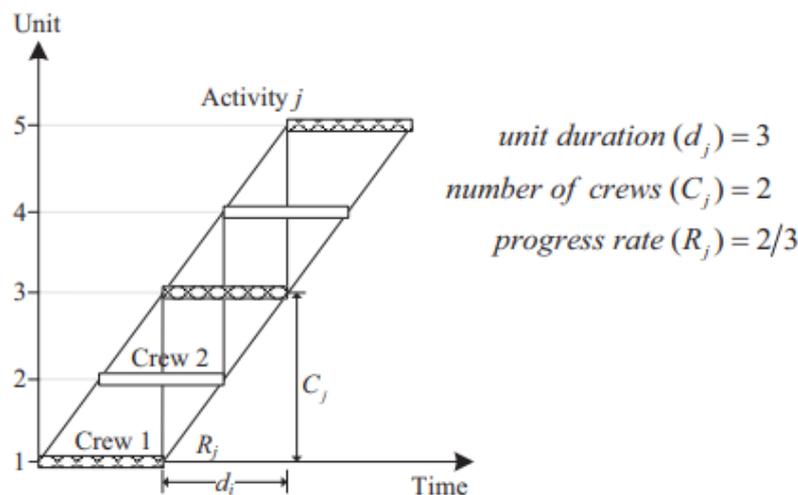
$$s_{p1} + d_p \leq s_{j1} \quad (9)$$

$$s_{pm} + d_p \leq s_{jm} \quad (10)$$

dengan s_{p1} = waktu mulai kegiatan *predecessor* p pada unit pertama, s_{j1} = waktu mulai kegiatan j pada unit pertama, s_{pm} = waktu mulai kegiatan *predecessor* p pada unit ke m , dan s_{jm} = waktu mulai kegiatan j pada unit ke m .

Hubungan antara waktu mulai untuk setiap kegiatan j pada unit pertama dan terakhir adalah saling terkait, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Dengan menghubungkan tingkat kemajuan setiap kegiatan pada unit pertama dan terakhir, maka persamaan matematisnya dapat diperoleh dari Persamaan 11 (Zou et al., 2018)

$$s_{j1} + (m - 1)d_j \sum_{k=1}^{\bar{k}_j} \frac{x_{jk}}{k} = s_{jm} \quad (11)$$



Gambar 2. Keberlanjutan *crew* pada suatu kegiatan (Zou et al., 2018)

Sementara itu, masih ada batasan lain yang harus terpenuhi, yaitu target waktu. Setiap proyek harus dapat selesai sebelum target waktu yang diberikan (δ). Dikarenakan kejadian $n + 1$ adalah kejadian akhir yang bersifat semu dan tunggal, maka batasan target waktu dapat dituliskan secara matematis seperti yang tertera pada Persamaan 12 (Zou et al., 2018).

$$s_{n+1,m} \leq \delta \quad (12)$$

dengan $s_{n+1,m}$ = waktu mulai kejadian $n + 1$ pada unit ke m dan δ = target waktu yang ditetapkan.

Agar permodelan dapat menjadi lebih sederhana, maka diasumsikan $\lambda_{jk} = k$ untuk setiap kegiatan j dan $crew$ yang bekerja sebanyak k , dengan tujuan untuk memperkecil jumlah $crew$ dan pekerja yang bekerja untuk setiap kegiatan. Optimasi ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel* dan *What'sBest! solver add in*. Pada kenyataannya, biaya dari setiap kegiatan ditentukan dengan mempertimbangkan biaya-biaya yang perlu dikeluarkan untuk setiap kegiatan, seperti yang tertulis pada Persamaan 13 (Zou et al., 2018).

$$\min \sum_{j \in A} \sum_{k=1}^{k_j} (MC_{jk} + LC_{jk} + EC_{jk})x_{jk} + IC - ECI - LDC \quad (13)$$

dengan MC_{jk} = biaya material kegiatan j ketika $crew$ yang dipekerjakan sebanyak k , LC_{jk} = biaya pekerja kegiatan j ketika $crew$ yang dipekerjakan sebanyak k , EC_{jk} = biaya peralatan kegiatan j ketika $crew$ yang dipekerjakan sebanyak k , IC = biaya tidak langsung dalam suatu proyek, ECI = insentif jika proyek selesai lebih cepat, dan LDC = biaya kecelakaan.

2. METODE PENELITIAN

Objek penelitian yang akan diteliti berupa proyek rumah tinggal yang terletak di Jakarta Timur, yang terdiri dari 2 lantai dengan luas tanah 72 m² dan luas bangunan 48 m² serta dengan jumlah 10 unit rumah yang memiliki tipe yang sama. Gambar 3 merupakan diagram alir penelitian pada proyek rumah tinggal di Jakarta Timur.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

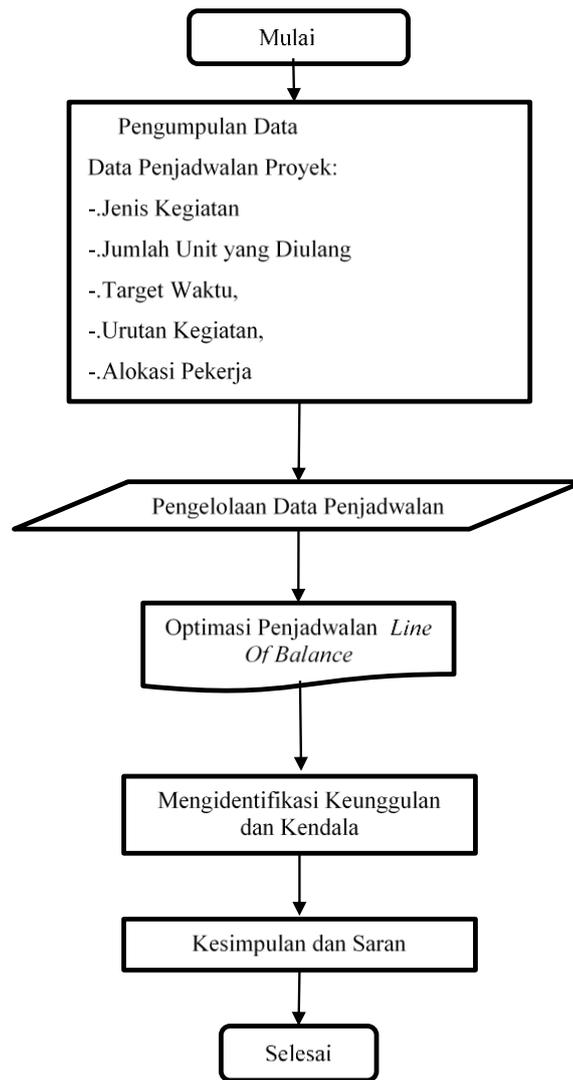
Langkah awal yang harus dilakukan adalah mengumpulkan data penjadwalan proyek, yang diperoleh dari proyek rumah tinggal di Jakarta Timur. Data-data yang dikumpulkan meliputi jenis kegiatan, jumlah unit yang diulang, urutan kegiatan, durasi dari setiap kegiatan, target waktu penyelesaian proyek, dan alokasi pekerja untuk mengerjakan setiap kegiatan. Proyek ini terdiri dari 12 kegiatan dan terdiri atas 10 unit rumah yang hendak dikerjakan. Deskripsi kegiatan, waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan setiap unit, jumlah pekerja dalam satu $crew$, jam kerja harian, logika ketergantungan kegiatan, dan durasi untuk setiap unit tertera pada Tabel 1. Durasi untuk sebuah aktivitas dapat dihitung dengan membagi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan tiap unit dengan jumlah pekerja dalam sebuah $crew$ dan jam kerja harian. Jumlah $crew$ yang tersedia untuk setiap kegiatan adalah sebanyak 10 $crew$ dan target waktu yang ditetapkan adalah 390 hari.

Setelah data proyek didapat, maka langkah selanjutnya adalah dengan melakukan *feasibility test* terlebih dahulu sebelum melakukan optimasi.

Uji kelayakan (*feasibility test*) proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

Feasibility test adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengetahui kelayakan dan kerealistisan dari suatu proyek. Ketika suatu proyek telah diketahui durasi dari kegiatan proyek tersebut serta target waktu yang lebih spesifik telah diberikan (δ), maka *feasibility test* ini dapat dilakukan dengan cara membandingkan target waktu yang diberikan dengan durasi proyek tercepat (SPD). Suatu proyek dapat dinyatakan layak apabila target waktu yang diberikan lebih besar atau sama dengan durasi proyek tercepat ($\delta \geq SPD$). Secara umum, langkah-langkah yang dilakukan untuk menentukan nilai SPD adalah sebagai berikut:

1. Menentukan terlebih dahulu nilai R_{jk_j} yang merupakan rasio *progress* untuk kegiatan yang ditinjau (j) ketika $crew$ yang dipekerjakan adalah sebanyak k_j dan R_{pk_p} yang merupakan rasio *progress* untuk kegiatan pendahulu (*predecessor*) (p) ketika $crew$ yang dipekerjakan adalah sebanyak k_p .
2. Menentukan nilai $t_{j,k_j}^1(p,k_p)$ yang merupakan waktu mulai tercepat untuk memulai kegiatan j pada unit pertama jika $crew$ yang bekerja sebesar k_j dan jika kegiatan j dan *predecessor* p memiliki keterkaitan, serta $t_{j,k_j}^m(p,k_p)$ yang merupakan waktu tercepat untuk memulai kegiatan j pada unit ke m jika $crew$ yang bekerja sebesar k_j , jika kegiatan j dan *predecessor* p memiliki keterkaitan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Data penjadwalan proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

No.	Kegiatan	Kode	<i>Predeces- sor</i>	Waktu yang dibutuhkan untuk tiap unit (jam)	Jumlah pekerja dalam sebuah <i>crew</i>	Jam kerja harian	Durasi tiap unit (hari)
1	Persiapan	A		224	4	8	7
2	Galian+Fondasi	B	A-FS	672	4	8	21
3	Beton	C	B-FS	5040	6	8	105
4	Dinding	D	C-SS+21	5040	6	8	105
5	Pintu dan Jendela	E	D-FS	1120	4	8	35
6	Atap	F	C-FS	1344	4	8	42
7	<i>Plafond</i>	G	F-FS	1344	4	8	42
8	<i>Electrical</i>	H	B-FS+21	448	2	8	28
9	Lantai	I	H-FS	1568	4	8	49
10	<i>Sanitary & Plumbing</i>	J	B-FS+28	896	4	8	28

Tabel 1 (lanjutan). Data penjadwalan proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

No.	Kegiatan	Kode	Predecessor	Waktu yang dibutuhkan untuk tiap unit (jam)	Jumlah pekerja dalam sebuah crew	Jam kerja harian	Durasi tiap unit (hari)
11	Pengecatan	K	E-FS;J-FS	784	2	8	49
12	Finishing	L	G-FS+7;I-FS	672	4	8	21

- Menentukan nilai $ES_{jk_j}^1$ yang merupakan waktu tercepat untuk memulai kegiatan j jika jumlah $crew$ yang bekerja sebanyak k_j pada pekerjaan unit pertama dan $ES_{jk_j}^m$ yang merupakan waktu tercepat untuk memulai kegiatan j jika $crew$ yang dipekerjakan sebesar k_j pada unit ke m .
- Menentukan nilai SPD dengan cara menjumlahkan nilai dari waktu tercepat untuk memulai kegiatan terakhir pada unit terakhir dengan durasi dari kegiatan tersebut.
- Membandingkan nilai durasi proyek tercepat (SPD) dengan target waktu yang diberikan (δ). Apabila target waktu yang diberikan (δ) lebih besar dibandingkan dengan nilai durasi proyek tercepat ($\delta \geq SPD$), maka proyek tersebut dinyatakan layak (*feasible*) dan dapat dilakukan optimasi.

Tabel 2 dan Tabel 3 merupakan tabel untuk perhitungan *feasibility test* dengan j adalah B, p adalah A-FS, d_j adalah 21, dan dp adalah 7.

Tabel 2. Hasil perhitungan uji kelayakan untuk waktu mulai unit pertama kegiatan galian dan fondasi proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

kj	kp	Rjkj	Rpkp	t j,kj(p,kp)										ES'j,kj	
1	1	0,05	0,14	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
2	2	0,10	0,29	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
3	3	0,14	0,43	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
4	4	0,19	0,57	22,75	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
5	5	0,24	0,71	32,20	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
6	6	0,29	0,86	38,50	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
7	7	0,33	1,00	43,00	11,50	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
8	8	0,38	1,14	46,38	14,88	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
9	9	0,43	1,29	49,00	17,50	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
10	10	0,48	1,43	51,10	19,60	9,10	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00

Tabel 3. Hasil perhitungan uji kelayakan untuk waktu mulai unit terakhir kegiatan galian dan fondasi proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

kj	kp	Rjkj	Rpkp	t10 j,kj(p,kp)										ES10 j,kj	
1	1	0,05	0,14	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196
2	2	0,10	0,29	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
3	3	0,14	0,43	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
4	4	0,19	0,57	70	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
5	5	0,24	0,71	70	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
6	6	0,29	0,86	70	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
7	7	0,33	1,00	70	39	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
8	8	0,38	1,14	70	39	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
9	9	0,43	1,29	70	39	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
10	10	0,48	1,43	70	39	28	26	26	26	26	26	26	26	26	26

Tabel 2 dan Tabel 3 merupakan tabel perhitungan kegiatan galian dan fondasi, kemudian dilakukan hal yang sama pada 11 kegiatan lainnya hingga kegiatan terakhir. Sehingga didapat durasi proyek tercepat proyek rumah tinggal di Jakarta Timur adalah 346,5 hari. Jika dibandingkan dengan target waktu yang ditetapkan, durasi proyek tercepat ini masih lebih kecil dibandingkan dengan target waktu yang ditetapkan, yaitu 390 hari. Maka, proyek ini dinyatakan layak (*feasible*) dan dapat dilakukan optimasi.

Optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*) LoB dengan target waktu penyelesaian proyek untuk proyek rumah tinggal di Jakarta Timur

Optimasi Penjadwalan dilakukan dengan menggunakan bantuan *add-in What'sBest! Solver* pada aplikasi perangkat lunak *Microsoft Excel*. Pada penelitian sebelumnya, untuk mencapai target waktu penyelesaian proyek yang ditetapkan, optimasi dilakukan dengan *linear objective function* untuk memperkecil jumlah *crew*. Dalam penelitian ini, optimasi akan dilakukan dengan *linear objective function* memperkecil jumlah biaya. Biaya pada penelitian ini diwakili oleh jumlah pekerja yang dipekerjakan untuk setiap kegiatan dan diasumsikan biaya untuk setiap pekerja adalah sama untuk setiap kegiatan.

Optimasi ini akan dilakukan dengan 2 kondisi. Pada kondisi pertama, fungsi objektif linier (*linear objective function*) yang digunakan adalah untuk memperkecil jumlah *crew* yang akan dipekerjakan, seperti pada penelitian sebelumnya, dengan memperhatikan hubungan keterkaitan antara waktu mulai untuk setiap kegiatan di unit pertama dan unit terakhir serta target waktu yang telah ditetapkan. Sementara itu, pada kondisi kedua, fungsi objektif linier (*linear objective function*) yang digunakan adalah untuk memperkecil jumlah biaya yang dikeluarkan untuk sebuah proyek, dengan tetap memperhatikan hubungan keterkaitan antara waktu mulai untuk setiap kegiatan di unit pertama dan unit terakhir, serta target waktu yang telah ditetapkan. Biaya untuk setiap kegiatan dapat dihitung dengan cara mengalikan jumlah pekerja pada setiap aktivitas dengan jumlah *crew* yang dipekerjakan.

Pada saat yang bersamaan, akan didapatkan pula waktu mulai setiap kegiatan untuk unit pertama dan unit terakhir. Dengan demikian, waktu selesai setiap kegiatan untuk unit pertama dan unit terakhir dapat ditentukan dengan cara menambahkan durasi masing-masing kegiatan dengan waktu mulai setiap kegiatan untuk unit pertama dan unit terakhir. Waktu mulai unit pertama dan terakhir untuk setiap kegiatan dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

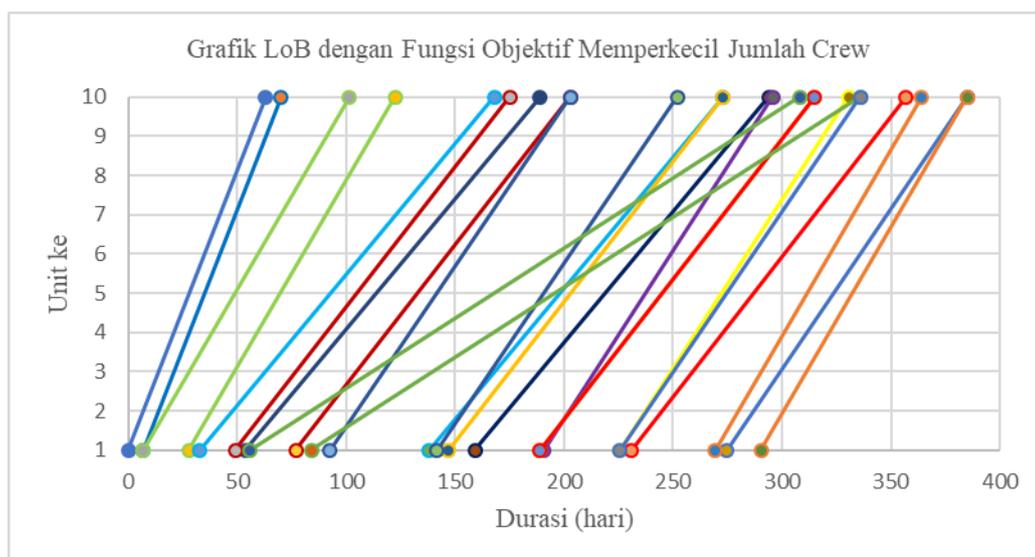
Tabel 4. Hasil optimasi penjadwalan proyek dengan target waktu penyelesaian proyek untuk proyek rumah tinggal di Jakarta Timur untuk kondisi pertama

Kegiatan	Durasi (hari)	Kondisi Pertama				Crew
		Waktu Mulai Unit Perta- ma	Waktu Selesai Unit Perta- ma	Waktu Mulai Unit Terak- hir	Waktu Selesai Unit Terak- hir	
Persiapan	7	0	7	63	70	1
Galian+Fondasi	21	7	28	101,5	122,5	2
Beton	105	33	138	168	273	7
Dinding	105	54	159	189	294	7
Pintu dan Jendela	35	190,75	225,75	295,75	330,75	3
Atap	42	147	189	273	315	3
Plafond	42	189	231	315	357	3
Electrical	28	49	77	175	203	2
Lantai	49	92,75	141,75	203	252	4
Sanitary & Plumbing	28	56	84	308	336	1
Pengecatan	49	225,75	274,75	336	385	4
Finishing	21	269,5	290,5	364	385	2

Tabel 5. Hasil optimasi penjadwalan proyek dengan target waktu penyelesaian proyek untuk proyek rumah tinggal di Jakarta Timur untuk kondisi kedua

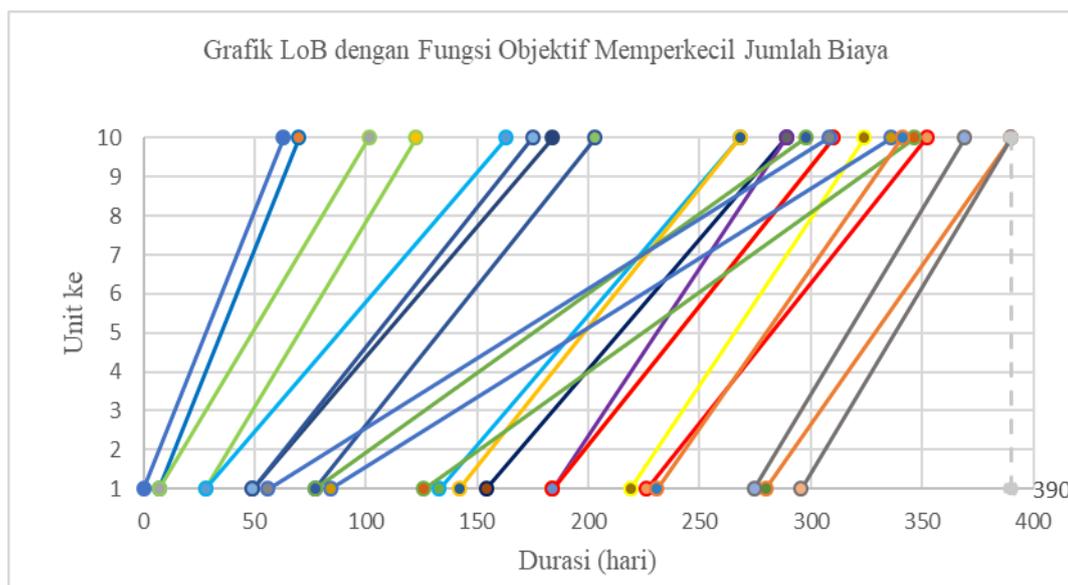
Kegiatan	Durasi (hari)	Kondisi Kedua				Crew
		Waktu Mulai Unit Pertama	Waktu Selesai Unit Pertama	Waktu Mulai Unit Terakhir	Waktu Selesai Unit Terakhir	
Persiapan	7	0	7	63	70	1
Galian+Fondasi	21	7	28	101,5	122,5	2
Beton	105	28	133	163	268	7
Dinding	105	49	154	184	289	7
Pintu dan Jendela	35	184	219	289	324	3
Atap	42	142	184	268	310	3
Plafond	42	184	226	310	352	3
Electrical	28	49	77	175	203	2
Lantai	49	77	126	297,5	346,5	2
Sanitary & Plumbing	28	56	84	308	336	1
Pengecatan	49	230,75	279,75	341	390	4
Finishing	21	274,5	295,5	369	390	2

Setelah didapatkan waktu mulai dan waktu selesai setiap kegiatan, grafik penjadwalan LoB pun dapat digambar dengan cara menghubungkan titik yang merupakan waktu mulai unit pertama dengan titik yang merupakan waktu mulai unit terakhir dan menghubungkan titik yang merupakan waktu selesai unit pertama dengan titik yang merupakan waktu selesai unit terakhir untuk setiap kegiatan. Grafik LoB untuk kondisi pertama dan kedua ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik LoB proyek rumah tinggal di Jakarta Timur dengan fungsi objektif memperkecil jumlah crew

Tabel 6 menunjukkan bahwa sebanyak sebanyak 39 crew harus dipekerjakan pada kondisi pertama dan sebanyak 37 crew harus dipekerjakan pada kondisi kedua, atau berkurang sebesar 5,12%. Sementara itu, jumlah pekerja yang dipekerjakan sebanyak 172 pekerja pada kondisi pertama dan sebanyak 164 pekerja harus dipekerjakan pada kondisi kedua atau berkurang sebesar 4,65% dan dengan asumsi biaya pekerja untuk setiap kegiatan adalah sama.



Gambar 5. Grafik LoB proyek rumah tinggal di Jakarta Timur dengan fungsi objektif memperkecil jumlah biaya

Tabel 6. Rangkuman hasil penelitian

Kode	Kegiatan	Jumlah Pekerja dalam sebuah <i>crew</i>	Durasi (hari)	Kondisi Pertama		Kondisi Kedua	
				Jumlah <i>Crew</i>	Jumlah Pekerja	Jumlah <i>Crew</i>	Jumlah Pekerja
A	Persiapan	4	7	1	4	1	4
B	Galian+Fondasi	4	21	2	8	2	8
C	Beton	6	105	7	42	7	42
D	Dinding	6	105	7	42	7	42
E	Pintu dan Jendela	4	35	3	12	3	12
F	Atap	4	42	3	12	3	12
G	Plafond	4	42	3	12	3	12
H	Electrical	2	28	2	4	2	4
I	Lantai	4	49	4	16	2	8
J	Sanitary & Plumbing	4	28	1	4	1	4
K	Pengecatan	2	49	4	8	4	8
L	Finishing	4	21	2	8	2	8
Total				39	172	37	164

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan optimasi penjadwalan proyek dengan target waktu penyelesaian proyek dilakukan dengan 2 tahap, yaitu uji kelayakan (*feasibility test*) yang bertujuan untuk mencari durasi proyek tercepat dan membandingkannya dengan target waktu penyelesaian proyek yang telah ditetapkan dan optimasi penjadwalan (*scheduling optimization*) dengan memasukkan *linear objective function* memperkecil jumlah biaya dan *linear constraints* antara lain keterkaitan antara waktu mulai untuk unit pertama dan terakhir untuk setiap kegiatan dan target waktu penyelesaian proyek.
2. Hasil dari optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek untuk proyek rumah tinggal di Jakarta Timur dengan memakai *linear objective function* untuk memperkecil jumlah *crew* menunjukkan

bahwa sebanyak 39 *crew* dan 172 pekerja harus dipekerjakan. Sedangkan jika optimasi penjadwalan *Line of Balance* dengan target waktu penyelesaian proyek untuk proyek rumah tinggal di Jakarta Timur dengan memakai *linear objective function* untuk memperkecil jumlah biaya, maka sebanyak 37 *crew* harus dipekerjakan atau berkurang sebesar 5,12% dan sebanyak 164 pekerja harus dipekerjakan atau berkurang sebesar 4,65%.

- Keunggulan dari optimasi penjadwalan proyek ini dari penelitian sebelumnya adalah optimasi ini dapat memperkecil jumlah *crew* dan pekerja yang dipekerjakan. Optimasi ini juga dapat mencapai target waktu penyelesaian proyek yang ditetapkan dengan biaya yang minimum. Adapun kendala dari metode optimasi ini adalah waktu yang dibutuhkan untuk menginput *linear constraints* serta *linear objective function* yang cukup lama dan diperlukan pengetahuan dan pemahaman yang cukup baik untuk membuat model optimasi yang dikehendaki.

Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran:

- Dalam melakukan optimasi penjadwalan proyek dengan target waktu penyelesaian proyek, disarankan untuk menghitung biaya untuk mempekerjakan *crew* dan pekerja dengan biaya yang berbeda untuk setiap kegiatan.
- Dalam melakukan optimasi penjadwalan proyek dengan target waktu penyelesaian proyek, disarankan untuk menggunakan target waktu yang lebih panjang agar *crew* dan pekerja yang dipekerjakan dapat lebih optimal dan menjadi lebih sedikit.
- Saran untuk proyek atau bidang industri yang lain, yaitu optimasi penjadwalan proyek metode LoB dengan target waktu penyelesaian proyek dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam menyusun penjadwalan dalam sebuah proyek atau industri karena terbukti dapat mengurangi jumlah *crew* dan pekerja yang dipekerjakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andriani, G. A., Sarah, A., & Rahmasari, K. (2018). *Konstruksi Dalam Angka*. Badan Pusat Statistik.
- Arditi, D., Tokdemir, O. B., & Suh, K. (2001). Effect of Learning on Line of Balance Scheduling. *International Journal of Project Management*, 19(5), 265-277.
- Aulia, M. A., Farisi, A. H., Wibowo, M. A., & Hidayat, A. (2017). Analisis Penggunaan Penjadwalan Line of Balance Pada Proyek Konstruksi Repetitif (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Apartemen Candiland-Semarang). *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(1), 127-137.
- Long, L. D., & Ohsato, A. (2009). A Genetic Algorithm-Based Method for Scheduling Repetitive Construction Projects. *Automation in Construction*, 18(4): 499-511.
- Sanjaya, D. (2012). *Studi Perbandingan Penjadwalan Proyek Metode Line of Balance (LoB) dan Precedence Diagram Method (PDM) Pada Pekerjaan Berulang (Repetitif)*. [Tugas Akhir, Universitas Sumatera Utara].
- Tokdemir, O. B., Erol, H., & Dikmen, I. (2019). Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line of Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2), 04018132.
- Zou, X., Zhang, Q., & Zhang, L. (2018). Modeling and Solving the Deadline Satisfaction Problem in Line of Balance Scheduling. *Journal of Management in Engineering*, 34(1): 04017044.

