

PENJADWALAN PROYEK MENGGUNAKAN MONTE CARLO SIMULATION PADA KONDISI TIDAK PASTI: STUDI KASUS WABAH COVID-19 DI SURABAYA

Michael Edwardo Sampurno¹, I Gede Agus Widyadana² dan Januar Budiman³

¹ Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

^{2,3} Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

¹ mich.edwardo@gmail.com, ² gede@petra.ac.id, ³ jbn2500@gmail.com

ABSTRAK: Pada makalah ini dilakukan pembahasan mengenai perencanaan penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* yang proses pembangunannya dihadapkan dengan wabah COVID-19. Penggunaan *Monte Carlo simulation* dalam melakukan perencanaan penjadwalan memperhitungkan risiko-risiko ketidakpastian yang menggunakan durasi probabilistik dalam setiap durasi aktivitas pekerjaannya. Penggunaan *Monte Carlo simulation* dalam melakukan perencanaan penjadwalan dapat menghasilkan model penjadwalan yang lebih sesuai dengan kondisi aktual apabila dibandingkan dengan menggunakan *critical path method*. Penelitian ini bertujuan meneliti penggunaan cara alternatif dalam mengestimasi durasi probabilistik apabila data historis tidak bisa didapatkan. Estimasi durasi probabilistik yang terbaik apabila tidak adanya data historis adalah dengan menggunakan cara kualitatif dengan *three-point estimate* menggunakan hasil wawancara dan diskusi dengan pihak kontraktor pada proyek studi kasus yang dilakukan pada durasi pekerjaan-pekerjaan awal dari proyek tersebut. Sedangkan untuk estimasi durasi aktivitas sisanya menggunakan hasil survei dengan pihak-pihak kontraktor lainnya selain dari proyek yang diteliti.

Kata kunci: perencanaan penjadwalan, *monte carlo simulation*, wabah COVID-19, estimasi durasi probabilistik

ABSTRACT: *This paper addresses Monte Carlo simulation in schedule planning when the construction process is faced with the COVID-19 outbreak. Monte Carlo simulation in schedule planning estimates the risks of uncertainty which uses probabilistic duration in the project activity. When compared to the critical path method, Monte Carlo simulation produces a schedule model that is more similar to the actual construction process faced with the COVID-19 outbreak. This paper examines the alternative method in probabilistic duration estimation in the absence of historical data. Yet, if there is no historical data, the alternative method in the probabilistic duration estimation is to use the three-point estimate. Therefore, the method to get the three-point estimate is to use the qualitative method. The results of interviews with the contractors from the study case project are compatible with earlier activities duration. Furthermore, the rest of the activities duration estimations are compatible with the results of surveys with other contractors apart from the study case project.*

Keywords: *schedule planning, monte carlo simulation, COVID-19 outbreak, probabilistic duration estimation*

1. PENDAHULUAN

Salah satu faktor penting untuk menghindari keterlambatan dalam suatu proyek konstruksi adalah melakukan penjadwalan proyek yang mempertimbangkan beberapa faktor ketidakpastian yang mungkin bisa terjadi, sehingga dapat mengurangi risiko penundaan suatu aktivitas dan mengestimasi probabilitas selesainya proyek konstruksi tersebut secara tepat. Wabah COVID-19 yang terjadi merupakan salah satu contoh faktor ketidakpastian yang mempengaruhi bidang konstruksi (Alenezi, 2020; Gamil & Alhagar, 2020). Metode yang paling umum digunakan untuk penjadwalan proyek adalah *critical path method* (CPM). Kekurangan dari penggunaan metode CPM ini adalah metode CPM menggunakan waktu deterministik dalam mengestimasi durasi suatu aktivitas, sehingga tidak memperhitungkan berbagai risiko ketidakpastian yang akan terjadi dalam proyek tersebut (Kirytopoulos et al., 2008).

Metode lain yang secara signifikan dapat membantu dalam proses analisis risiko, terutama penjadwalan adalah *Monte Carlo simulation* (Avlijas, 2018; Deshmukh & Rajhans, 2018; Kroese et al., 2014; Na et al., 2014). *Monte Carlo simulation* adalah metode yang pengambilan sampelnya dilakukan secara acak dari setiap distribusi probabilitas dalam suatu model untuk menghasilkan ratusan ataupun bahkan ribuan iterasi. Dalam bidang konstruksi, beberapa contoh sampel yang terdistribusi adalah durasi aktivitas dan estimasi biaya dengan hasil iterasi yang didapatkan yaitu durasi penyelesaian dan pengeluaran biaya total dari suatu proyek (Acebes et al., 2015). Beberapa akademisi menggunakan pendekatan estimasi *Optimistic*, *Most Likely*, dan *Pessimistic* untuk menetapkan distribusi statistik yang menjelaskan durasi setiap aktivitas dan pendekatan tiga poin estimasi ini menghasilkan distribusi *beta-PERT* atau *triangular* (Deshmukh & Rajhans, 2018).

Namun Opaleye et al. (2017) mengatakan bahwa untuk mengatasi masalah keterlambatan pada proyek, probabilitas distribusi yang digunakan harus disertai dengan data historis pada durasi suatu aktivitas. Data historis adalah data-data realisasi dari proyek sejenis sebelumnya. Penggunaan data historis dapat menghindari penggunaan pendekatan tiga poin estimasi dan dapat menentukan distribusi yang lebih spesifik, selain distribusi *beta-PERT* atau *triangular*, untuk menggambarkan durasi setiap aktivitas. Distribusi spesifik dari hasil data historis dapat ditentukan menjadi distribusi yang paling sesuai untuk pemodelan durasi setiap aktivitas (Kirytopoulos et al., 2008).

Penelitian ini dilakukan untuk melakukan simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* pada proyek yang proses pelaksanaan pembangunannya dilakukan pada saat wabah COVID-19 terjadi. Selain itu dilakukan juga penelitian mengenai penggunaan alternatif metode dalam mengestimasi durasi probabilistik setiap aktivitas pekerjaan apabila penggunaan data historis tidak bisa didapatkan. Setelah durasi probabilistik setiap aktivitas pekerjaan didapatkan, simulasi model penjadwalan didapatkan menggunakan *Monte Carlo simulation*. Model-model penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* berdasarkan penggunaan metode estimasi durasi probabilistik yang berbeda-beda dilakukan perbandingan dengan kondisi pengerjaan aktual di lapangan yang pembangunannya dilakukan pada saat wabah COVID-19 terjadi. Dari hasil perbandingan dengan kondisi pengerjaan aktual di lapangan dipilih metode yang paling tepat dalam mengestimasi durasi probabilistik setiap aktivitas pekerjaan. Proyek yang digunakan sebagai studi kasus dalam penelitian ini adalah

proyek perumahan tapak massal (*landed house*). Pada penelitian ini, *Monte Carlo simulation* dilakukan menggunakan bantuan *software add-ins Oracle Crystal Ball* pada *Microsoft Excel*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengaruh COVID-19 pada Sektor Konstruksi

Alenezi (2020) melakukan penelitian mengenai dampak COVID-19 terhadap proyek konstruksi di Kuwait menunjukkan bahwa proyek konstruksi mengalami keterlambatan dan penyebab utamanya adalah keterbatasan para pekerja untuk datang setiap saat akibat protokol kesehatan mengenai *physical distancing* untuk pencegahan penyebaran COVID-19 melalui kontak fisik. Hal ini mengakibatkan terjadinya keterlambatan pada aktivitas di jalur kritis pada proyek tersebut dan keseluruhan proyek pun akhirnya tertunda penyelesaiannya. Gamil & Alhagar (2020) melakukan penelitian mengenai dampak COVID-19 pada sektor konstruksi di Malaysia. Penelitian ini menemukan beberapa akibat dari wabah COVID-19 pada sektor konstruksi, yaitu pemberhentian proyek konstruksi, pemutusan hubungan kerja, penyelesaian proyek yang tertunda, pembengkakan biaya proyek, dan masalah keuangan pada perusahaan kontraktor. Pihak kontraktor juga menghadapi masalah hukum karena ketidaksesuaian persyaratan kontrak yang disebabkan oleh tertundanya proyek dan fluktuasi harga material yang secara tiba-tiba juga ikut berubah.

2.2. Estimasi Durasi Probabilistik Aktivitas

Penggunaan *three point estimate* menentukan kisaran (*range*) perkiraan untuk durasi aktivitas menggunakan durasi *Optimistic*, *Most Likely*, dan *Pessimistic*. Hasil dari *three point estimate* pada durasi aktivitas ini dapat menghasilkan suatu bentuk distribusi probabilitas yang menerus (*continuous distribution*), yaitu distribusi *beta-PERT* atau *triangular*. Penggunaan metode *three point estimate* dalam mengestimasi durasi suatu aktivitas dapat digunakan apabila kurangnya ataupun tidak adanya data-data realisasi historis mengenai proyek yang sejenis. Cara untuk mendapatkan tiga poin estimasi ini bisa dilakukannya wawancara dengan ahli atau *project manager* dalam proyek tersebut.

Penggunaan data historis untuk dapat membantu menghasilkan suatu distribusi probabilitas pada durasi aktivitas tersebut (Kirytopoulos et al., 2008; Opaleye et al., 2017). Data historis merupakan data-data realisasi pada proyek yang sejenis dan dari banyaknya data historis ini dapat menghasilkan estimasi suatu data dalam berbagai bentuk distribusi probabilitas yang kontinu, tidak seperti metode tiga poin estimasi yang hanya menghasilkan distribusi *beta-PERT* atau *triangular*.

2.3. Penyusunan Jadwal Proyek Menggunakan *Monte Carlo Simulation*

Monte Carlo simulation adalah metode yang pengambilan sampelnya dilakukan secara acak dari setiap distribusi probabilitas dalam suatu model untuk menghasilkan ratusan ataupun bahkan ribuan iterasi. *Monte Carlo simulation* sudah dilakukan dan diterapkan untuk berbagai bidang, seperti keuangan, sains, *supply chain*, industri, dan teknik sipil.

Beberapa akademisi sudah banyak yang meneliti *Monte Carlo simulation* dalam bidang penjadwalan konstruksi (Acebes et al., 2015; Agarwal & Virine, 2016; Avlijas, 2018; Choudhry et al., 2014; Deshmukh & Rajhans, 2018; Hajdu & Bokor, 2016; Kirytopoulos et al., 2008; Kwak & Ingall, 2009; Na et al., 2014), namun masih sedikit yang menerapkannya pada kondisi aktual. Menurut Kwak & Ingall (2009), penyebab sedikitnya penerapan *Monte Carlo simulation* ini disebabkan oleh tidak familier nya para *project manager* dengan metode ini, hanya menambah pekerjaan dan menghabiskan waktu, serta penggunaan stokastik lanjutan pada metode ini yang dirasa terlalu susah untuk dilakukan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Studi Kasus

Studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini merupakan perumahan tapak massal (*landed house*) yaitu perumahan di kota Surabaya. Rumah yang dibangun merupakan rumah tipikal dua lantai dengan rumah tipe 69 yang berarti memiliki total luas bangunan seluas 69 meter persegi diatas lahan tanah dengan ukuran 5 x 12 meter persegi. Proyek perumahan tapak massal (*landed house*) ini dibangun pada saat wabah COVID-19 terjadi, namun menggunakan data penjadwalan yang direncanakan pada kondisi normal. Data penjadwalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data penjadwalan tiap satu unit rumah. Proyek perumahan tapak massal dipilih dengan tujuan untuk mendapatkan data historis dari proyek sejenis yang pembangunannya telah rampung sehingga estimasi durasi probabilistik dapat didapatkan dengan menggunakan *fit distribution*.

3.2. Estimasi Durasi Probabilistik

3.2.1. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kuantitatif

Estimasi durasi probabilistik cara kuantitatif menggunakan banyaknya data historis lalu diolah menggunakan *fit distribution* untuk mendapatkan estimasi durasi dalam bentuk distribusi probabilistik. Data historis didapatkan dari proyek-proyek yang telah rampung pelaksanaan pembangunannya pada kondisi COVID-19 dan dalam penelitian ini digunakan proyek perumahan tapak massal dengan harapan bisa mendapatkan banyak data penjadwalan aktual proyek yang telah rampung pembangunannya pada proyek rumah yang sejenis. Data historis yang didapatkan digunakan untuk mengestimasi durasi aktivitas secara probabilistik dengan cara menggunakan *fit distribution* pada *adds-in Oracle Crystal Ball* pada *Microsoft Excel* untuk mendapatkan durasi probabilistik yang berbentuk suatu distribusi probabilistik.

3.2.2. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kualitatif

Estimasi durasi probabilistik cara kualitatif digunakan untuk mengatasi kurangnya data historis pada penjadwalan proyek yang dilakukan setelah terjadi COVID-19 mengingat kondisi dan situasi pada saat COVID-19 ini terjadi banyaknya proyek yang harus berhenti bahkan keterbatasan peneliti untuk dapat mendapatkan data penjadwalan ke berbagai tempat.

Estimasi durasi probabilistik secara kualitatif ini bisa didapatkan dengan cara menggunakan *Three-Point Estimate* yaitu menggunakan durasi *optimistic*, *most likely*, dan *pessimistic* yang menghasilkan suatu distribusi probabilitas kontinu berbentuk distribusi *beta-PERT* atau triangular. Dalam penelitian ini, distribusi probabilistik yang digunakan untuk semua aktivitas pekerjaan menggunakan distribusi *triangular* dan *beta-PERT*, sehingga dihasilkan dua hasil

simulasi yang berbeda. Pada akhir penelitian dilakukan analisis mengenai distribusi yang paling tepat untuk digunakan sebagai estimasi durasi probabilistik pada proyek perumahan.

3.3. Estimasi Durasi Keseluruhan Proyek Menggunakan *Monte Carlo Simulation*

Setelah setiap aktivitas telah terdefinisi, serta telah saling berurutan atas ketergantungan masing-masing aktivitas, dan durasinya juga telah diberi estimasi dalam bentuk distribusi probabilistik, *Monte Carlo simulation* pun dapat dilakukan untuk mendapatkan estimasi probabilitas durasi keseluruhan proyek. *Monte Carlo simulation* dilakukan untuk mendapatkan simulasi pada penjadwalan proyek sebelum COVID-19 dan simulasi pada penjadwalan proyek setelah COVID-19 terjadi. Simulasi-simulasi yang terbentuk menggunakan *Monte Carlo simulation* menghasilkan model penjadwalan dalam bentuk probabilitas yang dilakukan analisis dan pembahasan dari hasil tersebut.

Hasil dari model penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* dilakukan perbandingan dengan total durasi pelaksanaan pengerjaan pada kondisi aktual yang pelaksanaan pembangunannya telah selesai 100%. *Monte Carlo simulation* menghasilkan suatu model penjadwalan dalam bentuk distribusi probabilistik yang bisa diubah menjadi bentuk grafik kumulatif yang menunjukkan berapa probabilitas persentase untuk terjadinya total durasi penyelesaian satu unit rumah tersebut. Lalu total durasi yang dihasilkan pada kondisi pengerjaan aktual dapat dilihat berapa persentase probabilitas untuk terjadi dari hasil simulasi penjadwalan yang telah dihasilkan tersebut.

4. HASIL PENELITIAN

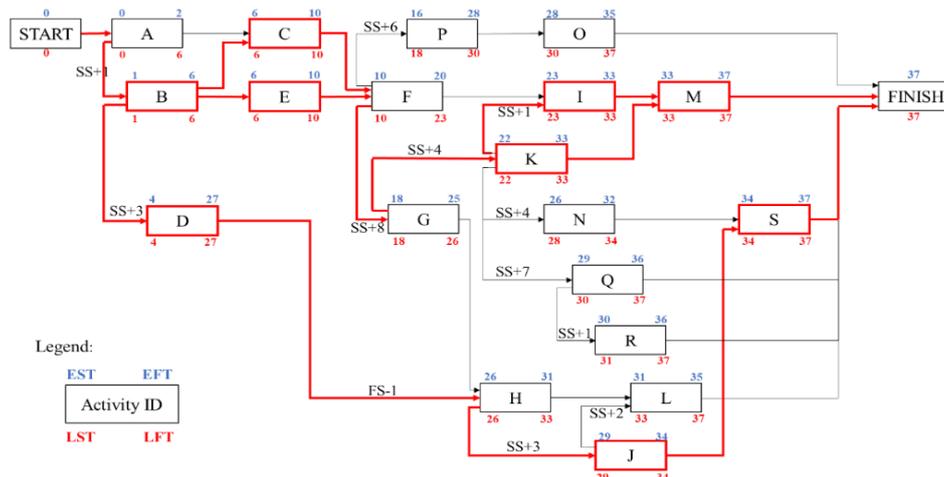
4.1. Perencanaan Penjadwalan pada Kondisi Normal

Pada studi kasus yang diteliti, perencanaan penjadwalan untuk proyek ini direncanakan pada saat kondisi normal atau pada saat belum ada yang memperkirakan terjadinya wabah COVID-19. Sehingga pada perencanaan penjadwalan tersebut yang menggunakan durasi deterministik dalam estimasi seluruh aktivitas pekerjaannya tidak disertakan risiko-risiko ketidakpastian yang dapat terjadi.

Sebelum dilakukan simulasi perhitungan total durasi penjadwalan untuk satu unit rumah menggunakan *Monte Carlo simulation*, langkah awal yang dilakukan adalah perhitungan total durasi penjadwalan dihitung dengan metode *critical path method* (CPM) terlebih dahulu untuk mendapatkan jalur kritis yang menghitung total durasi penjadwalan satu unit rumah menggunakan durasi deterministik pada setiap aktivitasnya dan dapat digunakan sebagai perbandingan pada nantinya dengan hasil dari simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation*. Selain itu, hasil dari perhitungan penjadwalan menggunakan *critical path method* ini pada nantinya dilakukan perbandingan dengan hasil simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation*. Durasi deterministik didapatkan dari data penjadwalan dari pihak kontraktor tempat studi kasus penelitian dilakukan yang pelaksanaan pembangunannya direncanakan untuk dibangun sebelum wabah COVID-19 terjadi atau pada kondisi normal pada proyek studi kasus penelitian ini yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Durasi Deterministik pada Satu Unit Rumah

Detail Pekerjaan	Activity ID	Durasi (Minggu)
Pekerjaan Persiapan	A	2
Pekerjaan Pondasi	B	5
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	C	4
Pekerjaan Struktur Bangunan	D	23
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	E	4
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	F	10
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	G	7
Pekerjaan Atap	H	5
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	I	10
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	J	5
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	K	11
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	L	4
Pekerjaan Pasang Sanitair	M	4
Pekerjaan Tampak Depan	N	6
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	O	7
Pekerjaan Pagar Keliling	P	12
Pekerjaan pengecatan	Q	7
Pekerjaan Carport dan Halaman	R	6
Pekerjaan Kebersihan	S	3



Gambar 1. *Critical Path Method* pada Durasi Satu Unit Rumah

Berdasarkan Activity ID, durasi setiap aktivitas dan urutan aktivitas yang telah direncanakan menggunakan *critical path method* yang ditunjukkan pada Gambar 1, maka total durasi pada satu unit rumah adalah 37 minggu.

Penjadwalan perencanaan untuk pelaksanaan pembangunan pada kondisi normal yang awalnya menggunakan durasi deterministik dilakukan perubahan dan pengolahan menjadi durasi probabilistik secara kualitatif dengan cara mewawancarai pihak konstruksi di proyek perumahan studi kasus tersebut yang telah memiliki pengalaman bekerja di bidang konstruksi selama 7 tahun. Hasil wawancara ditunjukkan dalam Tabel 2 yang mana pihak konstruksi tersebut mengubah durasi deterministik menjadi durasi *optimistic*, *most likely*, dan *pessimistic* untuk semua aktivitas pekerjaan berdasarkan pengalaman dari pihak konstruksi tersebut selama bekerja di dunia konstruksi mengenai kondisi terbaik ataupun kontingensi-kontingensi yang diperlukan pada durasi suatu aktivitas pekerjaan.

Tabel 2. Durasi Probabilistik Secara Kualitatif pada Kondisi Normal

Detail Pekerjaan	Durasi (Minggu)		
	<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Persiapan	2	2	4
Pekerjaan Pondasi	5	5	10
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	2	4	8
Pekerjaan Struktur Bangunan	17,5	23	28,5
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	4	4	8
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	6,5	10	11,5
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	3,5	7	10,5
Pekerjaan Atap	3,5	5	6,5
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	10	10	15
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	2,5	5	10
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	5,5	11	16,5
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	3	4	6
Pekerjaan Pasang Sanitair	2	4	6
Pekerjaan Tampak Depan	4	6	9
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	3,5	7	10,5
Pekerjaan Pagar Keliling	8,5	12	18
Pekerjaan Pengecatan	3,5	7	10,5
Pekerjaan Carport dan Halaman	4	6	9
Pekerjaan Kebersihan	2,5	3	6

Simulasi untuk mendapatkan model penjadwalan satu rumah menggunakan *Monte Carlo simulation* dilakukan sebanyak dua kali simulasi dengan estimasi distribusi probabilistik yang berbeda, yaitu simulasi penjadwalan yang pertama dilakukan menggunakan distribusi *triangular* pada seluruh aktivitas pekerjaan dan simulasi penjadwalan yang kedua dilakukan menggunakan distribusi *beta-PERT* pada seluruh aktivitas pekerjaan. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis perbedaan dan penggunaan distribusi kualitatif yang terbaik pada proyek perumahan.

Berikutnya dilakukan perhitungan durasi penjadwalan satu rumah menggunakan *Monte Carlo simulation* pada kondisi normal dengan jumlah simulasi sebanyak 1000 iterasi. *Mean* atau rata-rata total durasi penyelesaian satu unit rumah adalah 43,15 minggu dengan standar deviasi sebesar 1,93 apabila menggunakan distribusi *triangular*. Sedangkan *mean* atau rata-rata total durasi penyelesaian satu unit rumah adalah 41,02 minggu dengan standar deviasi sebesar 1,50 apabila menggunakan distribusi *beta-PERT*. Terdapat selisih sekitar 2 minggu lebih lama apabila durasi probabilistik seluruh aktivitas menggunakan distribusi *triangular* dibandingkan dengan distribusi *beta-PERT*.

Berikutnya dilakukan perbandingan dari hasil *Monte Carlo simulation* dalam membuat model penjadwalan satu unit rumah pada kondisi normal dengan hasil dari metode *critical path method*. Probabilitas satu unit rumah selesai dengan waktu 37 minggu yang merupakan hasil dari metode *critical path method* dapat terjadi dengan probabilitas 0% pada simulasi yang menggunakan distribusi *triangular* pada durasi probabilistik seluruh aktivitas dan 0,12% pada simulasi yang menggunakan distribusi *beta-PERT* pada durasi probabilistik seluruh aktivitas. Dengan kata lain total durasi penyelesaian 37 minggu tidak memungkinkan untuk terjadi apabila perhitungan total durasi penyelesaian satu unit rumah menggunakan *Monte Carlo simulation* baik menggunakan distribusi *triangular* maupun *beta-PERT*. Oleh karena itu

penggunaan *Monte Carlo simulation* dapat menghasilkan suatu model penjadwalan berbentuk probabilistik dengan memperhitungkan risiko yang bisa terjadi, sedangkan metode *critical path method* hanya bisa menghasilkan satu angka hasil total durasi yang kemungkinan besar tidak bisa terealisasi.

4.2. Estimasi Durasi Probabilistik pada Kondisi COVID-19

Pelaksanaan pembangunan perumahan ini dilakukan pada saat wabah COVID-19 terjadi yang mana proses pelaksanaan pembangunannya dihadapi dengan banyak tantangan dan permasalahan yang disebabkan oleh wabah COVID-19 ini. Oleh karena itu, penjadwalan yang awalnya direncanakan untuk dilaksanakan pembangunannya pada kondisi normal menggunakan durasi deterministik dilakukan perubahan dan pengolahan akibat COVID-19 dengan diberi kontingensi seperti penambahan durasi pekerjaan pada penjadwalan tersebut untuk mendapatkan durasi probabilistik pada wabah COVID-19. Beberapa cara dilakukan untuk memodifikasi dan mengubah durasi deterministik pada kondisi normal untuk di simulasikan dengan *Monte Carlo simulation* sehingga bisa mendapatkan durasi probabilistik pada musim COVID-19.

4.2.1. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kuantitatif

Pada perencanaan awal dari penelitian ini diharapkan bisa menggunakan data historis dari pembangunan rumah yang telah selesai pada proyek tempat peneliti melakukan studi kasus ataupun pihak proyek lain untuk bisa mengestimasi durasi probabilistik secara kuantitatif. Namun 16 rumah yang dijadwalkan untuk selesai pembangunannya pada bulan November 2020 mengalami kemunduran yang mana hingga minggu pertama bulan April 2021, unit rumah yang telah dalam proses pembangunan sudah sejumlah 16 unit. Dari 16 unit tersebut, 1 unit telah selesai yang dijadikan sebagai rumah contoh dan telah dilakukan proses serah terima dengan client, 1 unit pekerjaannya sudah selesai hingga 94%, dan unit lainnya masih dalam proses pembangunan hingga pekerjaan pemasangan dinding. Selain itu, pihak proyek lain sejenis juga menolak permohonan peneliti untuk mengajukan data penjadwalan yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

Oleh karena itu, pada penelitian ini estimasi durasi probabilistik secara kuantitatif tidak bisa dilakukan pada seluruh durasi aktivitas pekerjaan dikarenakan data historis yang didapatkan tidak mencukupi untuk melakukan estimasi durasi probabilistik secara kuantitatif. *Oracle crystal ball* juga membatasi data untuk bisa melakukan *fitted distribution* adalah membutuhkan minimal 15 data. Beberapa aktivitas pekerjaan masih bisa dilakukan *fitted distribution* karena data durasi pekerjaan yang dibutuhkan sudah mencukupi. Aktivitas pekerjaan tersebut adalah pekerjaan persiapan, pekerjaan pondasi, pekerjaan pemipaan air kotor, pekerjaan struktur bangunan, pekerjaan bata rata nol, dan pekerjaan dinding. Aktivitas-aktivitas pekerjaan tersebut telah rampung seluruhnya pada 16 rumah. Hasil distribusi probabilistik yang dihasilkan menggunakan cara *fitted* yang ditunjukkan dalam Tabel 3 menggunakan *goodness of fit anderson-darling* dengan nilai *p-value* diatas 5% untuk menerima H_0 yaitu distribusi probabilistik yang dihasilkan sama dengan kondisi data historis yang didapatkan. Namun, terdapat satu pekerjaan yang menolak H_0 yaitu pekerjaan pemipaan air kotor karena *p-value* tertinggi yang didapatkan dari berbagai distribusi yang dihasilkan hanya 1,7% saja. Hal ini terjadi karena data historis yang digunakan masih kurang banyak untuk dapat mendapatkan suatu bentuk distribusi probabilistik yang baik. Namun, untuk penelitian ini tetap digunakan

hasil dari *fitted distribution* ini karena pada penelitian ini dilakukan pencarian alternatif estimasi durasi apabila data historis yang didapatkan terbatas, sesuai dengan kondisi yang terjadi pada penelitian ini.

Tabel 3. Hasil *Fitted Distribution* pada Beberapa Durasi Probabilistik Aktivitas Pekerjaan

Detail Pekerjaan	<i>Fitted Distribution</i>
Pekerjaan Persiapan	<i>Weibull</i>
Pekerjaan Pondasi	<i>Uniform</i>
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	<i>Uniform</i>
Pekerjaan Struktur Bangunan	<i>Gamma</i>
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	<i>Uniform</i>
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	<i>Weibull</i>

Dari hasil estimasi durasi probabilistik dengan *fitted distribution* pada beberapa aktivitas pekerjaan yang menggunakan data historis dilakukan perbandingan pada nantinya dengan cara kualitatif pada sub-bab berikutnya. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui dan menentukan alternatif cara lain dalam mengestimasi durasi probabilistik pada setiap aktivitas pekerjaan apabila dihadapi dengan kurangnya data historis sehingga estimasi durasi probabilistik tidak bisa dilakukan secara kuantitatif.

4.2.2. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kualitatif Cara 1

Cara kualitatif pertama yang dilakukan adalah dengan menambah semua durasi aktivitas pekerjaan pada kondisi normal dengan suatu persentase dari durasi itu sendiri. Metode pertama ini didapatkan dengan cara mewawancarai pihak konstruksi dari perumahan studi kasus mengenai apa saja faktor utama yang paling mempengaruhi durasi semua aktivitas pekerjaan akibat dari COVID-19 dan berapa bobot dalam persentase yang harus ditambahkan untuk semua durasi aktivitas pekerjaan.

Faktor utama yang pertama dan paling menentukan adalah faktor finansial yang mana proyek perumahan ini merupakan properti dari PT. X. PT. X ini merupakan suatu developer yang salah satu penghasilan utamanya adalah dari jual beli properti. Wabah COVID-19 mengakibatkan berkurangnya para peminat properti sehingga penghasilan dari developer PT. X ini pun berkurang. Akibat dari penghasilan yang berkurang, maka material yang dibutuhkan pun mengalami keterlambatan dalam penyediaan untuk pelaksanaan pembangunan.

Faktor kedua adalah tenaga kerja atau sumber daya manusia yang mana merupakan faktor penting juga dalam berbagai pelaksanaan pembangunan. Namun, wabah COVID-19 mengakibatkan harus dilaksanakannya berbagai protokol kesehatan yang harus dipatuhi. Hal pertama adalah diberlakukannya pembatasan sosial berskala besar (PSBB) yang mengharuskan semua pekerjaan dihentikan dan beberapa tenaga kerja memutuskan untuk kembali ke kampung halamannya. Setelah masa PSBB di Surabaya telah selesai beberapa tenaga kerja mengalami kesulitan untuk kembali ke Surabaya karena beberapa kota masih menerapkan lockdown yang mengakibatkan semua orang tidak bisa secara bebas keluar masuk dan beberapa juga ada yang harus menerapkan isolasi mandiri terlebih dahulu saat sudah kembali ke Surabaya.

Dari kedua faktor utama yang mempengaruhi keterlambatan total durasi penyelesaian akibat wabah COVID-19 tersebut, maka ditetapkan bobot persentase yang perlu ditambahkan ke seluruh durasi aktivitas pekerjaan adalah sebesar 40% dari durasi pada kondisi normal. Hasil penambahan seluruh durasi aktivitas dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Durasi Probabilistik secara Kualitatif Menggunakan Cara 1

Detail Pekerjaan	Durasi (Minggu)		
	<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Persiapan	2,8	2,8	5,6
Pekerjaan Pondasi	7	7	14
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	2,8	5,6	11,2
Pekerjaan Struktur Bangunan	24,5	32,2	39,9
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	5,6	5,6	11,2
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	9,1	14	16,1
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	4,9	9,8	14,7
Pekerjaan Atap	4,9	7	9,1
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	14	14	21
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	3,5	7	14
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	7,7	15,4	23,1
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	4,2	5,6	8,4
Pekerjaan Pasang Sanitair	2,8	5,6	8,4
Pekerjaan Tampak Depan	5,6	8,4	12,6
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	4,9	9,8	14,7
Pekerjaan Pagar Keliling	11,9	16,8	25,2
Pekerjaan Pengecatan	4,9	9,8	14,7
Pekerjaan Carport dan Halaman	5,6	8,4	12,6
Pekerjaan Kebersihan	3,5	4,2	8,4

4.2.3. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kualitatif Cara 2

Metode kedua ini dilakukan dengan cara menambahkan durasi pada beberapa aktivitas yang sangat terpengaruh karena dampak wabah COVID-19 terjadi. Metode ini didapatkan dengan cara yang sama yaitu mewawancarai pihak konstruksi dari perumahan studi kasus. Dari pengalaman yang telah dialami oleh pihak konstruksi tersebut, beberapa hal yang harus diperhatikan dan diberi penambahan durasi pada aktivitas pekerjaan akibat dari dampak COVID-19 adalah sebagai berikut:

- Pekerjaan persiapan
 Pada saat pekerjaan persiapan, beberapa pekerja ada yang masih berada di kampung halamannya dan harus melakukan lockdown, walaupun sudah kembali ke Surabaya untuk bekerja tetap harus mengikuti protokol isolasi mandiri terlebih dahulu selama 2 minggu. Sehingga dalam pekerjaan persiapan harus dipastikan terlebih dahulu kondisi kesiapan para tenaga kerja untuk dapat bekerja dengan baik dan sehat, sehingga produktivitas pekerjaan yang dihasilkan bisa cukup tinggi. Sehingga ditetapkan durasi *most likely* ditambah 2 minggu dan durasi *pessimistic* ditambah 4 minggu.
- Pekerjaan struktur atas dan bawah
 Pekerjaan struktur baik atas dan bawah membutuhkan jumlah material yang cukup banyak dan memiliki bobot aktivitas pekerjaan yang paling tinggi dibandingkan dengan aktivitas pekerjaan yang lainnya. Sehingga perlu dipastikan terlebih dahulu untuk

kesediaan materi sesuai dengan kebutuhan. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah bisa membuat *schedule material* dari satu atau dua bulan sebelumnya. Apabila terjadi masalah finansial sehingga tidak bisa memenuhi kebutuhan material yang dibutuhkan, maka bisa dilakukan pembelian material secara berkala sesuai dengan kondisi finansial serta dari sisi tenaga kerja dapat dibagi dalam pengerjaan untuk bisa mengerjakan aktivitas pekerjaan lainnya terlebih dahulu sambil menunggu material dari struktur bangunan ini telah didapatkan. Sehingga ditetapkan durasi *most likely* ditambah 4 minggu dan durasi *pessimistic* ditambah 4 minggu.

- Pekerjaan yang dilakukan oleh subkontraktor
Pekerjaan-pekerjaan yang dilakukan oleh subkontraktor beberapa mengalami kendala, terutama pada pekerjaan plafond, pekerjaan sanitair, dan pekerjaan kusen, pintu, jendela. Kendala yang terjadi adalah subkontraktor-subkontraktor tersebut mengalami kesulitan keuangan dan kekurangan inventori nya, sedangkan konsumen yang menggunakan subkontraktor ini tidak hanya dari proyek ini saja. Hal ini mengakibatkan subkontraktor tersebut mengalami kendala dalam memenuhi kebutuhan dengan semua proyek yang telah melakukan kontrak. Pada akhirnya aktivitas pekerjaan plafond dilakukan perubahan subkontraktor. Hal ini juga memakan waktu dalam mencari subkontraktor yang tepat dan sesuai dengan kebutuhan. Oleh karena itu disiapkan kontingensi berupa penambahan durasi beberapa minggu untuk mengatasi risiko apabila terjadi keterlambatan pengerjaan atau pengiriman dari pihak subkontraktor dan bisa dilakukan aktivitas pekerjaan yang lain terlebih dahulu. Sehingga ditetapkan durasi *most likely* ditambah 4 minggu dan durasi *pessimistic* ditambah 8 minggu.

Durasi *optimistic* tidak dilakukan penambahan karena pada durasi *optimistic* digambarkan segalanya berjalan dengan lancar tanpa adanya kendala atau produktivitas dari tukang sangat tinggi sehingga aktivitas pekerjaan bisa diselesaikan lebih cepat. Hasil penambahan durasi dari jadwal perencanaan pada kondisi normal ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Durasi Probabilistik secara Kualitatif Menggunakan Cara 2

Detail Pekerjaan	Durasi (Minggu)		
	<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Persiapan	2	4	8
Pekerjaan Pondasi	5	9	14
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	2	4	8
Pekerjaan Struktur Bangunan	17,5	27	32,5
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	4	4	8
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	6,5	10	11,5
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	3,5	7	10,5
Pekerjaan Atap	3,5	5	6,5
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	10	10	15
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	2,5	9	18
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	5,5	11	16,5
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	3	4	6
Pekerjaan Pasang Sanitair	2	8	14
Pekerjaan Tampak Depan	4	6	9
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	3,5	11	18,5

Tabel 5. Durasi Probabilistik secara Kualitatif Menggunakan Cara 2 (Sambungan)

Detail Pekerjaan	Durasi (Minggu)		
	<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Pagar Keliling	8,5	12	18
Pekerjaan Pengecatan	3,5	7	10,5
Pekerjaan Carport dan Halaman	4	6	9
Pekerjaan Kebersihan	2,5	3	6

4.2.4. Estimasi Durasi Probabilistik secara Kualitatif Cara 3

Cara kualitatif yang ketiga serupa dengan cara pertama yang menggunakan bobot persentase yang berbeda untuk penambahan setiap durasi aktivitas pekerjaan pada kondisi normal. Namun bobot persentase yang didapatkan pada cara ketiga ini adalah melakukan survei kepada beberapa pihak kontraktor selain kontraktor pada tempat studi kasus yang dilakukan pada penelitian ini. Pihak kontraktor yang dipilih untuk dilakukan survei adalah kontraktor yang telah bekerja di bidang konstruksi lebih dari 1 tahun dan memiliki pengalaman dalam membangun suatu proyek konstruksi skala kecil menengah pada saat pandemi COVID-19 terjadi.

Pihak-pihak kontraktor menentukan jumlah persentase yang perlu ditingkatkan pada durasi setiap aktivitas proyek studi kasus penelitian ini yang terdampak wabah COVID-19 menurut pengalaman masing-masing. Persentase yang didapat dari berbagai pihak kontraktor tersebut lalu dirata-rata sebagai persentase yang ditingkatkan pada durasi probabilistik masing-masing aktivitas.

Dari hasil survei didapatkan 11 orang sebagai pihak kontraktor yang telah memiliki pengalaman membangun setidaknya satu proyek pada kondisi wabah COVID-19. Seluruh persentase rata-rata dijadikan sebagai bobot persentase penambahan pada durasi probabilistik aktivitas pekerjaan pada kondisi normal untuk masing-masing aktivitas pekerjaan dari studi kasus penelitian ini sesuai dengan persentase yang didapatkan. Hasil penambahan bobot persentase tersebut ditunjukkan dalam Tabel 6.

Tabel.6. Durasi Probabilistik secara Kualitatif Menggunakan Cara 3

Detail Pekerjaan	Persentase penambahan durasi	Durasi (Minggu)		
		<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Persiapan	15%	2,29	2,29	4,58
Pekerjaan Pondasi	49%	7,45	7,45	14,91
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	19%	2,38	4,76	9,53
Pekerjaan Struktur Bangunan	58%	27,68	36,38	45,08
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	21%	4,84	4,84	9,67
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	35%	8,75	13,45	15,47
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	16%	4,07	8,15	12,22
Pekerjaan Atap	45%	5,09	7,27	9,45
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	25%	12,55	12,55	18,82
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	26%	3,16	6,32	12,64
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	14%	6,25	12,50	18,75
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	19%	3,57	4,76	7,15
Pekerjaan Pasang Sanitair	17%	2,35	4,69	7,04
Pekerjaan Tampak Depan	12%	4,47	6,71	10,06

Tabel 6. Durasi Probabilistik secara Kualitatif Menggunakan Cara 3 (Sambungan)

Detail Pekerjaan	Persentase penambahan durasi	Durasi (Minggu)		
		<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	22%	4,26	8,53	12,79
Pekerjaan Pagar Keliling	16%	9,89	13,96	20,95
Pekerjaan Pengecatan	14%	3,98	7,95	11,93
Pekerjaan Carport dan Halaman	7%	4,29	6,44	9,65
Pekerjaan Kebersihan	5%	2,61	3,14	6,27

4.3. Analisis Perbandingan Hasil Simulasi Penjadwalan *Monte Carlo Simulation* dengan Kondisi Aktual

Setelah semua hasil simulasi penjadwalan *Monte Carlo simulation* dilakukan berdasarkan estimasi durasi probabilistik yang didapatkan dengan cara yang berbeda-beda, hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan total durasi penyelesaian pada kondisi pengerjaan aktual di lapangan. Hal ini dilakukan bertujuan untuk mendapatkan probabilitas persentase kemungkinan terjadinya total durasi penyelesaian pada kondisi pengerjaan aktual tersebut pada model penjadwalan dari hasil simulasi yang didapatkan. Simulasi dari semua cara estimasi durasi probabilistik dilakukan sebanyak 2 kali menggunakan distribusi *triangular* dan *beta-PERT* yang bertujuan untuk menganalisis distribusi mana yang paling cocok digunakan pada penelitian ini apabila dibandingkan dengan kondisi pengerjaan aktual. Ringkasan hasil model simulasi penjadwalan yang telah dilakukan ditunjukkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan Hasil Simulasi Penjadwalan Menggunakan *Monte Carlo Simulation*

Estimasi Durasi Probabilistik	Hasil <i>Monte Carlo Simulation</i>		Probabilitas Penyelesaian pada Kondisi Aktual
	Mean (Minggu)	Standar Deviasi	
Cara 1 (<i>Triangular</i>)	56,05	2,86	0,46%
Cara 1 (<i>Beta-PERT</i>)	53,33	2,48	2,86%
Cara 2 (<i>Triangular</i>)	50,88	3,09	27,37%
Cara 2 (<i>Beta-PERT</i>)	49,50	2,77	42,67%
Cara 3 (<i>Triangular</i>)	54,80	3,40	2,85%
Cara 3 (<i>Beta-PERT</i>)	53,40	3,50	10,64%

Dari Tabel 7 dapat disimpulkan bahwa penggunaan distribusi *triangular* sebagai estimasi seluruh durasi aktivitas pekerjaan menghasilkan prediksi penjadwalan yang lebih lama apabila dibandingkan dengan penggunaan distribusi *beta-PERT* sebagai estimasi seluruh durasi aktivitas pekerjaan. Sedangkan apabila dibandingkan dengan kondisi aktual, distribusi *beta-PERT* sebagai durasi probabilistik seluruh aktivitas merupakan distribusi terbaik apabila menggunakan cara kualitatif dalam mengestimasi durasi probabilistik seluruh aktivitas. Hal ini ditunjukkan dari hasil probabilitas penyelesaian pada kondisi aktual yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan distribusi *triangular* sebagai durasi probabilistik pada seluruh durasi aktivitas di semua cara estimasi durasi probabilistik yang dilakukan pada penelitian ini.

Cara 2 yang menggunakan distribusi *beta-PERT* terbukti dapat menghasilkan probabilitas penyelesaian dengan kondisi aktual yang paling tinggi dibandingkan dengan cara kualitatif yang lainnya. Sehingga, pada penelitian ini dalam mengestimasi durasi probabilistik secara

kualitatif, cara yang paling baik dilakukan adalah mengestimasi durasi probabilistik dengan melakukan wawancara dan diskusi dengan pihak kontraktor pada studi kasus mengenai penambahan pada durasi aktivitas-aktivitas yang sangat terdampak akibat dari wabah COVID-19 yang terjadi. Hal ini membuktikan bahwa prediksi yang lebih detail oleh pihak kontraktor yang terlibat langsung pada tempat proyek dibangun yang dihadapi wabah COVID-19 menghasilkan prediksi penjadwalan yang lebih tepat dengan kondisi pengerjaan aktual.

4.4. Validasi Hasil Simulasi Penjadwalan menggunakan Estimasi Durasi Probabilistik Cara Kualitatif dengan Cara Kuantitatif

Hasil dari simulasi penjadwalan menggunakan estimasi probabilistik durasi keseluruhan proyek yang didapatkan menggunakan cara kualitatif dilakukan validasi dengan cara kuantitatif. Validasi ini dilakukan dengan tujuan untuk melihat apakah hasil simulasi menggunakan estimasi durasi probabilistik menggunakan cara-cara kualitatif yang dilakukan memiliki hasil simulasi yang sama secara statistik dengan hasil simulasi menggunakan estimasi durasi probabilistik secara kuantitatif. Namun, hasil simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* untuk semua cara estimasi durasi probabilistik yang dilakukan hanya sampai aktivitas pekerjaan pasangan dinding. Hal ini disebabkan karena data historis yang didapatkan hanya sampai pekerjaan pasangan dinding, sehingga cara estimasi kualitatif dilakukan perlakuan yang sama untuk bisa dilakukan perbandingan dengan cara kuantitatif.

Validasi hasil simulasi menggunakan analisis *z-test* untuk dua sampel *mean* dengan tingkat *confidence level* sebesar 95%. H_0 adalah hasil simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* dengan estimasi durasi probabilistik secara kualitatif tidak terdapat perbedaan dibandingkan dengan estimasi durasi probabilistik secara kuantitatif. Nilai *alpha* yang digunakan adalah sebesar 5%, sehingga nilai *z two tailed* yang didapatkan menggunakan tabel *z* adalah -1,96 dan 1,96.

Dari hasil analisis *z-test* dalam Tabel 8, H_0 dapat diterima hanya pada hasil simulasi penjadwalan menggunakan cara 2 dengan distribusi beta-PERT yang menghasilkan nilai *z* sebesar 1,51. Maka dapat disimpulkan bahwa dalam penelitian ini, hasil simulasi penjadwalan yang sama secara statistik dalam menggunakan estimasi durasi probabilistik secara kuantitatif adalah menggunakan estimasi durasi probabilistik secara kualitatif menggunakan distribusi *beta-PERT* yang didapatkan dengan cara melakukan wawancara dan diskusi dengan pihak kontraktor yang terlibat pada tempat studi kasus penelitian mengenai penambahan pada beberapa durasi aktivitas pekerjaan saja yang sangat terdampak akibat dari wabah COVID-19 yang terjadi.

Tabel 8. Hasil Analisis Z-Test untuk Dua Sampel *Mean* yang Berbeda

Estimasi Durasi Probabilistik	Mean (Minggu)	Standar Deviasi	Z-test for Two Sample Mean
Cara 1 (<i>Triangular</i>)	36,27	2,91	58,78
Cara 1 (<i>Beta-PERT</i>)	36,35	2,88	60,11
Cara 2 (<i>Triangular</i>)	29,79	2,79	-6,21
Cara 2 (<i>Beta-PERT</i>)	30,53	2,66	1,51
Cara 3 (<i>Triangular</i>)	40,24	3,49	84,10
Cara 3 (<i>Beta-PERT</i>)	40,52	3,3	90,87
Cara Kuantitatif	30,39	1,24	-

4.5. Analisis Perbandingan Hasil Simulasi Penjadwalan dengan Substitusi Estimasi Durasi Probabilistik Cara Kuantitatif

Estimasi durasi probabilistik yang dihasilkan menggunakan cara kuantitatif dengan hasil *fitted distribution* pada aktivitas pekerjaan persiapan, pekerjaan pondasi, pekerjaan pemipaan air kotor, pekerjaan struktur bangunan, pekerjaan pasang bata rata nol, dan pekerjaan pasang dinding digunakan sebagai estimasi durasi probabilistik pada cara 1, cara 2, dan cara 3. Sehingga estimasi durasi probabilistik pekerjaan persiapan hingga pekerjaan pasang dinding pada cara 1, cara 2, dan cara 3 menggunakan hasil dari *fitted distribution*, sedangkan aktivitas pekerjaan sisanya dari pekerjaan instalasi air bersih hingga pekerjaan kebersihan menggunakan estimasi durasi probabilistik cara kualitatif masing-masing.

Tabel 9. Hasil Substitusi Estimasi Durasi Probabilistik Cara Kuantitatif pada Hasil Simulasi dan Probabilitas Penyelesaian pada Kondisi Aktual

Estimasi Durasi Probabilistik	Hasil <i>Monte Carlo Simulation</i>		Probabilitas Penyelesaian pada Kondisi Aktual
	Mean (Minggu)	Standar Deviasi	
Cara 1 (<i>Triangular</i>)	51,92	2,93	18,17%
Cara 1 (<i>Beta-PERT</i>)	50,81	2,87	28,26%
Cara 2 (<i>Triangular</i>)	49,49	3,1	43,30%
Cara 2 (<i>Beta-PERT</i>)	48,86	2,76	51,49%
Cara 3 (<i>Triangular</i>)	48,2	2,6	63,01%
Cara 3 (<i>Beta-PERT</i>)	46,9	2,3	80,90%

Dalam Tabel 9 ditunjukkan bahwa probabilitas penyelesaian pada kondisi aktual menggunakan substitusi estimasi durasi probabilistik dengan bantuan data historis menghasilkan probabilitas yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan hasil simulasi yang tidak dilakukan substitusi estimasi durasi menggunakan data historis dalam Tabel 7 sebelumnya. Hal ini membuktikan bahwa estimasi durasi probabilistik menggunakan data historis atau secara kuantitas merupakan cara estimasi durasi probabilistik yang terbaik karena dapat menghasilkan persentase probabilitas penyelesaian yang mendekati pada kondisi aktual.

Apabila dibandingkan dengan Tabel 7, jika dilihat pada cara 2 dengan distribusi *beta-PERT* setelah dilakukan substitusi durasi probabilistik dengan data historis, probabilitas penyelesaian pada kondisi aktual yang didapatkan mengalami peningkatan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi durasi probabilistik menggunakan cara 2 dengan menggunakan cara kuantitatif dengan data historis pada pekerjaan awal (pekerjaan persiapan, pekerjaan pondasi, pekerjaan pemipaan air kotor, pekerjaan struktur bangunan, pekerjaan pasang bata rata nol, dan pekerjaan pasang dinding) menghasilkan estimasi yang tidak terlalu berbeda jauh dengan peningkatan persentase probabilitas yang tidak terlalu signifikan. Sedangkan pada cara 3 yang menggunakan distribusi *beta-PERT* setelah dilakukan substitusi durasi probabilistik dengan data historis menghasilkan probabilitas penyelesaian pada kondisi aktual yang jauh lebih tinggi, yaitu dari 14,04% menjadi 80,90%.

Hal ini menunjukkan hasil yang berbanding terbalik pada cara 2 sebelumnya yang mana pada estimasi durasi probabilistik cara 3 ini menghasilkan estimasi yang berbeda dengan hasil estimasi durasi aktivitas menggunakan data historis pada pekerjaan awal. Maka dapat

disimpulkan bahwa untuk mendapatkan simulasi penjadwalan yang lebih tepat dan sesuai dengan kondisi aktual pengerjaan pada kondisi COVID-19, estimasi durasi probabilistik dengan cara 2 lebih tepat untuk dilakukan pada aktivitas pekerjaan-pekerjaan awal dan cara 3 lebih tepat digunakan untuk aktivitas pekerjaan-pekerjaan akhir.

4.6. Analisis Hasil Simulasi Penjadwalan dengan Estimasi Durasi Probabilistik Kombinasi Cara 2 dan Cara 3

Simulasi penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* dengan estimasi durasi probabilistik yang dilakukan kombinasi antara cara 2 dan cara 3 dilakukan untuk mendapatkan prediksi simulasi penjadwalan yang lebih sesuai pada kondisi pengerjaan aktual pada kondisi tidak pasti, yaitu wabah COVID-19. Kombinasi yang dimaksud adalah estimasi durasi probabilistik dilakukan dengan dua cara kualitatif yang berbeda yaitu cara 2 yang menggunakan hasil wawancara dan diskusi mengenai aktivitas pekerjaan apa saja yang terdampak akibat wabah COVID-19 dengan pihak kontraktor langsung pada proyek tempat studi kasus penelitian dilakukan pada aktivitas pekerjaan awal dan cara 3 yang menggunakan hasil survei dengan pihak-pihak lain di luar tempat studi kasus penelitian dilakukan pada aktivitas pekerjaan akhir.

Kombinasi estimasi durasi probabilistik yang dilakukan adalah estimasi durasi probabilistik cara 2 dilakukan pada aktivitas pekerjaan persiapan hingga pekerjaan plesteran dan acian, sedangkan untuk cara 3 dilakukan pada aktivitas pekerjaan plafond hingga pekerjaan kebersihan. Distribusi probabilistik yang digunakan pada simulasi ini adalah distribusi beta-PERT. Hasil kombinasi estimasi durasi probabilistik pada setiap aktivitas pekerjaan ditunjukkan dalam Tabel 10.

Tabel 10. Kombinasi Durasi Probabilistik Menggunakan Cara 2 dan Cara 3

Detail Pekerjaan	Durasi (Minggu)		
	<i>Optimistic</i>	<i>Most Likely</i>	<i>Pessimistic</i>
Pekerjaan Persiapan	2	4	8
Pekerjaan Pondasi	5	9	14
Pekerjaan Pemipaan Air Kotor	2	4	8
Pekerjaan Struktur Bangunan	17,5	27	32,5
Pekerjaan Pasangan Bata Rata Nol	4	4	8
Pekerjaan Pasangan Dinding (2 lantai)	6,5	10	11,5
Pekerjaan Instalasi Air Bersih	3,5	7	10,5
Pekerjaan Atap	3,5	5	6,5
Pekerjaan Plesteran dan Acian (2 lantai)	10	10	15
Pekerjaan Pasang Plafond (2 lantai)	3,16	6,32	12,64
Pekerjaan Instalasi Listrik (2 lantai)	6,25	11,00	18,75
Pekerjaan Pasang Keramik (2 lantai)	3,57	4,00	7,15
Pekerjaan Pasang Sanitair	2,35	4,69	7,04
Pekerjaan Tampak Depan	4,58	6,87	10,31
Pekerjaan Pasang Kusen, Pintu, Jendela	4,26	8,53	12,79
Pekerjaan Pagar Keliling	9,89	13,96	20,95
Pekerjaan Pengecatan	3,98	7,95	11,93
Pekerjaan Carport dan Halaman	4,29	6,44	9,65
Pekerjaan Kebersihan	2,61	3,14	6,27

Setelah dilakukan kombinasi pada estimasi durasi probabilistik dengan cara 2 pada aktivitas pekerjaan awal dan cara 3 pada aktivitas pekerjaan akhir, terbukti bahwa pada penelitian ini dapat menghasilkan simulasi penjadwalan yang lebih tepat dan sesuai dengan kondisi aktual pengerjaan pembangunan pada wabah COVID-19. Hal ini ditunjukkan dengan tercapainya probabilitas penyelesaian simulasi penjadwalan dengan kondisi total durasi aktual pembangunan 49 minggu sebesar 85,27%. Probabilitas yang tercapai ini lebih tinggi dari hasil simulasi lainnya yang telah dilakukan pada penelitian ini, bahkan pada simulasi ini tidak memerlukan bantuan data historis dalam mengestimasi durasi probabilistik pada aktivitas pekerjaannya. Maka, cara kombinasi ini membuktikan bahwa dalam mengestimasi durasi probabilistik, cara 2 lebih baik dilakukan pada aktivitas pekerjaan awal dan cara 3 lebih baik dilakukan pada aktivitas pekerjaan akhir yang tidak membutuhkan bantuan data historis sama sekali dalam mengestimasi durasi probabilistik setiap aktivitas pekerjaan pada penelitian ini.

5. KESIMPULAN

Perencanaan penjadwalan menggunakan *critical path method* dengan durasi setiap aktivitas yang direncanakan pada kondisi normal mendapatkan hasil durasi penyelesaian satu rumah sebesar 37 minggu dan dibandingkan dengan kondisi pengerjaan aktual yang dihadapkan COVID-19 dengan durasi penyelesaian sebesar 49 minggu memiliki selisih yang sangat besar. Hal ini membuktikan bahwa pada masa pandemi COVID-19, perencanaan penjadwalan tidak bisa menggunakan data dan metode perencanaan pada kondisi normal.

Model perencanaan penjadwalan yang dihasilkan menggunakan *Monte Carlo simulation* menghasilkan total durasi penyelesaian dalam bentuk distribusi probabilistik sehingga memiliki *mean* dan standar deviasi yang dapat memprediksi beberapa risiko yang bisa terjadi apabila pembangunannya dilakukan pada kondisi wabah COVID-19 terjadi.

Cara terbaik dalam mendapatkan estimasi durasi probabilistik untuk seluruh aktivitas adalah menggunakan cara kuantitatif atau menggunakan data historis pada proyek sejenis dan estimasi durasi probabilistik didapatkan menggunakan *fitted distribution*. Distribusi yang tepat digunakan apabila menggunakan cara kualitatif atau three-point estimate dalam mengestimasi durasi probabilistik seluruh aktivitas adalah menggunakan distribusi *beta-PERT* pada proyek perumahan sederhana.

Simulasi perencanaan penjadwalan menggunakan *Monte Carlo simulation* dengan cara estimasi durasi probabilitas secara kualitatif (distribusi beta-PERT) yang berbeda dilakukan perbandingan dengan kondisi aktual pengerjaan pada masa wabah COVID-19:

1. Cara pertama adalah menambah semua durasi aktivitas pekerjaan dengan suatu persentase dari durasi itu sendiri yang didapat dengan hasil wawancara bersama pihak kontraktor pada studi kasus yang bersangkutan. Probabilitas terjadinya total durasi pengerjaan aktual satu unit rumah sebesar 49 minggu dengan cara pertama ini adalah 2,86%.
2. Cara kedua adalah melakukan wawancara dan diskusi dengan pihak kontraktor yang terlibat pada tempat studi kasus penelitian mengenai penambahan pada beberapa durasi aktivitas pekerjaan saja yang sangat terdampak akibat dari wabah COVID-19 yang terjadi.

Probabilitas terjadinya total durasi pengerjaan aktual satu unit rumah sebesar 49 minggu dengan cara kedua ini adalah 42,67%.

3. Cara ketiga adalah menambah semua durasi aktivitas pekerjaan dengan suatu persentasenya masing-masing yang didapatkan dari hasil survei pada pihak-pihak kontraktor selain pada tempat studi kasus penelitian yang memiliki pengalaman membangun proyek sejenis pada saat wabah COVID-19 terjadi. Probabilitas terjadinya total durasi pengerjaan aktual satu unit rumah sebesar 49 minggu dengan cara ketiga ini adalah 10,64%.

Hasil simulasi penjadwalan dengan estimasi durasi probabilistik cara kualitatif kedua tervalidasi sama secara statistik dengan hasil simulasi penjadwalan menggunakan estimasi durasi probabilistik dengan data historis pada pekerjaan awal (pekerjaan persiapan, pekerjaan pondasi, pekerjaan pemipaan air kotor, pekerjaan struktur bangunan, pekerjaan pasang bata rata nol, dan pekerjaan pasang dinding).

Alternatif cara terbaik pada penelitian ini apabila cara kuantitatif menggunakan data historis tidak bisa dilakukan dalam mengestimasi durasi probabilistik seluruh aktivitas pekerjaan adalah dengan melakukan kombinasi cara kualitatif kedua dan ketiga. Cara kedua dilakukan pada durasi probabilistik aktivitas pekerjaan-pekerjaan awal dan cara ketiga dilakukan pada durasi probabilistik aktivitas pekerjaan-pekerjaan akhir.

6. DAFTAR REFERENSI

- Acebes, F., Pereda, M., Poza, D., Pajares, J., & Galán, J. M. (2015). Stochastic Earned Value Analysis using Monte Carlo Simulation and Statistical Learning Techniques. *International Journal of Project Management*, 33(7), 1597–1609. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.06.012>
- Agarwal, R., & Virine, L. (2016). Monte Carlo Project Risk Analysis. *Handbook of Research on Leveraging Risk and Uncertainties for Effective Project Management*, 109–129. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1790-0.ch005>
- Alenezi, T. A. N. (2020). The Impact of COVID-19 on Construction Projects in Kuwait. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 8(4), 6–9. https://www.researchgate.net/publication/344588873_The_Impact_Of_Covid-19_On_Construction_Projects_In_Kuwait
- Avlijas, G. (2018). Examining the Value of Monte Carlo Simulation for Project Time Management. *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 24(1), 11. <https://doi.org/10.7595/management.fon.2018.0004>
- Choudhry, R. M., Aslam, M. A., & Arain, F. M. (2014). Cost and Schedule Risk Analysis of Bridge Construction in Pakistan: Establishing Risk Guidelines. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000857](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000857)
- Deshmukh, P., & Rajhans, N. (2018). Comparison of Project Scheduling Techniques: PERT versus Monte Carlo Simulation. *Industrial Engineering Journal*, 11(7). <https://doi.org/10.26488/iej.11.7.1134>
- Gamil, Y., & Alhagar, A. (2020). The Impact of Pandemic Crisis on the Survival of Construction Industry: A Case of COVID-19. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 11(4), 122. <https://doi.org/10.36941/mjss-2020-0047>

- Hajdu, M., & Bokor, O. (2016). Sensitivity Analysis in PERT Networks: Does Activity Duration Distribution Matter? *Automation in Construction*, 65, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.01.003>
- Kirytopoulos, K. A., Leopoulos, V. N., & Diamantas, V. K. (2008). PERT vs. Monte Carlo Simulation along with the Suitable Distribution Effect. *International Journal of Project Organisation and Management*, 1(1), 24–46. <https://doi.org/10.1504/IJPOM.2008.020027>
- Kroese, D. P., Brereton, T., Taimre, T., & Botev, Z. I. (2014). Why the Monte Carlo Method is so Important Today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 6(6), 386–392. <https://doi.org/10.1002/wics.1314>
- Kwak, Y., & Ingall, L. (2009). Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management. *IEEE Engineering Management Review*, 37(2), 83–83. <https://doi.org/10.1109/emr.2009.5235458>
- Na, W., Wuliang, P., & Hua, G. (2014). A Robustness Simulation Method of Project Schedule Based on the Monte Carlo Method. *Open Cybernetics and Systemics Journal*, 8(1), 254–258. <https://doi.org/10.2174/1874110x01408010254>
- Opaleye, A. A., Charles-owaba, O. E., & Bender, B. (2017). Relevance of Historical-Data Based Activity Scheduling and Risk Mitigation Model. *International Journal of Science and Technology*, 6(3), 728–732. https://www.researchgate.net/publication/320244605_Relevance_Of_Historical-Data_Based_Activity_Scheduling_And_Risk_Mitigation_Model?_sg=R8lZB8BtQJ-4c2mhVoASDw1CJ0-uFvQeNOIXKv8X-ASW0MgBq-3xV67CWSIsBQSpnyWTJQrzw_N5K3w