

Analisis Biaya dan Waktu Proyek Konstruksi dengan Metode *Duration Cost Trade Off*

Nathaza Viera Tangkeallo ^{*1a}, Josefina Ernestine Latupeirissa ^{*2}, Herby Calvin Pascal Tiyouw ^{*3}

Submit:
30 Mei 2024

Review:
10 Juni 2024

Revised:
29 Juni 2024

Published :
5 November
2024

^{*1} Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, vieranathaza@gmail.com

^{*2} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, josefine_ernestine@yahoo.com

^{*3} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia, herbycalvin@ukipaulus.ac.id

^aCorresponding Author: vieranathaza@gmail.com

Abstrak

Keberhasilan dan kegagalan proyek sangat dipengaruhi oleh waktu dan biaya. Tolak ukur keberhasilan proyek adalah minimnya biaya dengan waktu penyelesaian yang singkat dan kualitas baik. Pengendalian proyek yang efektif diperlukan untuk memastikan waktu pengerjaan sesuai kontrak atau lebih cepat, sehingga biaya tetap menguntungkan dan menghindari denda akibat keterlambatan. Konsep *Duration Cost Trade Off* menunjukkan hubungan antara lama waktu penyelesaian proyek (durasi) dengan biaya terkait. Penelitian ini menganalisis biaya dan waktu proyek konstruksi menggunakan metode ini. Pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung dan tidak langsung, mencakup biaya pengeluaran proyek dan waktu pelaksanaan proyek. Analisis data melibatkan pembuatan kurva S, perhitungan *Cost Slope*, dan *Crash Cost*. Hasil menunjukkan bahwa percepatan waktu proyek dapat dicapai dengan menambah tenaga kerja dan melakukan beberapa pekerjaan secara bersamaan (*overlapping*). Kesimpulan penelitian ini adalah bahwa hubungan durasi proyek dan biaya sangat dinamis dan kompleks. Metode percepatan proyek melalui penambahan tenaga kerja dan *overlapping* dapat mempercepat waktu proyek dari 220 hari menjadi 107 hari dengan tambahan biaya Rp.528.556.809,27, lebih murah dibandingkan biaya keterlambatan sebesar Rp.581.439.976,00. Nilai *cost slope* adalah Rp124.862.427,66.

Kata kunci : Waktu Proyek, Biaya Proyek, Pengendalian Proyek, *Duration Cost Trade Off*

Abstract

The success and failure of a project are greatly influenced by time and cost. The benchmark for project success is minimal cost with short completion time and good quality. Effective project control is needed to ensure the completion time is according to the contract or faster, so that costs remain profitable and avoid fines due to delays. The concept of Duration Cost Trade Off shows the relationship between the length of time for project completion (duration) and related costs. This study analyzes the cost and time of construction projects using this method. Data collection was carried out through direct and indirect observations, including project expenditure costs and project implementation time. Data analysis involved creating an S curve, calculating Cost Slope, and Crash Cost. The results showed that project time acceleration can be achieved by adding workers and doing several jobs simultaneously (overlapping). The conclusion of this study is that the relationship between project duration and cost is very dynamic and complex. The project acceleration method by adding workers and overlapping

can accelerate the project time from 220 days to 107 days with an additional cost of Rp528,556,809.27, cheaper than the cost of delay of Rp581,439,976.00. The cost slope value is Rp124,862,427.66.

Keywords : *Project Time, Project Cost, Project Control, Duration Cost Trade Off*

PENDAHULUAN

Keberhasilan dan kegagalan proyek sangat bergantung pada manajemen waktu dan biaya. Tolak ukur keberhasilan sebuah proyek dapat dilihat dari efisiensi biaya, waktu penyelesaian yang cepat, dan kualitas hasil pekerjaan yang baik. Pengendalian proyek yang efektif penting untuk memastikan bahwa proyek selesai sesuai dengan jadwal kontrak atau bahkan lebih cepat, sehingga biaya yang dikeluarkan dapat mendatangkan keuntungan dan menghindari denda karena keterlambatan. Konsep *duration cost trade off* dalam manajemen proyek menggambarkan hubungan antara durasi penyelesaian proyek dan biaya yang terkait. Ada dua aspek utama dari konsep ini: pertama, durasi proyek adalah total waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan semua kegiatan proyek, yang berpengaruh pada kapan proyek dapat selesai dan beroperasi. Kedua, biaya proyek mencakup semua pengeluaran yang terkait dengan pelaksanaan proyek, termasuk tenaga kerja, bahan, peralatan, serta biaya *overhead* dan administratif, yang dapat mempengaruhi anggaran dan profitabilitas proyek. Penelitian ini memfokuskan pada pembangunan Pastoran dan Aula Gereja di Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10, Kota Makassar, yang terdiri dari tiga lantai: lantai 1 untuk sekretariat paroki dan pastoran, lantai 2 untuk tempat tinggal pastor, dan lantai 3 untuk aula. Proyek ini sering mengalami keterlambatan, yang menyebabkan denda sebesar 1/1000 dari nilai total proyek per hari keterlambatan. Dengan rencana awal 365 hari, proyek telah berlangsung selama 221 hari dan mencapai 64,84% penyelesaian, menyisakan 144 hari. Namun, untuk menyelesaikan sisa 35,16% diperlukan tambahan waktu 220 hari, sehingga proyek diperkirakan akan terlambat 76 hari, yang mengakibatkan denda tambahan.

Berikut ini beberapa penelitian terkait: Optimasi durasi dan biaya proyek menggunakan analisis *duration-cost trade-off* menemukan bahwa penerapan metode ini dapat secara signifikan mengurangi total biaya proyek sebesar 12%. Selain itu, mereka juga berhasil memperpendek waktu penyelesaian proyek sebesar 15%, menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam meningkatkan efisiensi proyek tanpa mengorbankan biaya yang terlalu besar. [1], teknik *duration-cost trade-off* dapat membantu dalam menyeimbangkan waktu dan biaya proyek konstruksi. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa penerapan metode ini berhasil mengurangi keterlambatan proyek sebesar 20%, serta menurunkan biaya tambahan yang dikeluarkan sebesar 8%. Ini membuktikan bahwa metode ini dapat digunakan untuk mengatasi masalah keterlambatan sambil tetap menjaga biaya tetap dalam batas yang wajar.[2], Penggunaan metode *duration-cost trade-off* dalam manajemen proyek dapat meningkatkan efisiensi proyek secara keseluruhan. Mereka mencatat bahwa metode ini mampu mengurangi waktu penyelesaian proyek sebesar 18% dan juga menurunkan biaya proyek sebesar 10%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan analisis yang tepat, proyek dapat diselesaikan lebih cepat dan lebih ekonomis.[3], Studi kasus pada pembangunan Pastoran dan Aula Gereja dan menemukan bahwa penerapan metode *duration-cost trade-off* menghasilkan pengurangan waktu proyek sebesar 12% dan penghematan biaya sebesar 7%. Studi ini menekankan bahwa teknik ini efektif dalam proyek-proyek spesifik dan dapat menghasilkan efisiensi yang signifikan dalam hal waktu dan biaya.[4]. Perbandingan metode *duration-cost trade-off* dan metode

yang lainnya, dengan hasil bahwa penerapan metode ini dapat mengurangi keterlambatan proyek sebesar 15% serta biaya tambahan sebesar 9%. Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis *duration-cost trade-off* dapat lebih efektif dibandingkan metode lain dalam mengurangi dampak keterlambatan dan biaya tambahan.[5]. Strategi *duration-cost trade-off* dalam pengelolaan proyek dan melaporkan bahwa strategi ini berhasil memperpendek durasi proyek sebesar 10% serta mengurangi biaya tambahan sebesar 11%. Penelitian ini menggarisbawahi efektivitas strategi ini dalam mengelola waktu dan biaya proyek secara bersamaan.[6]. Penerapan metode *duration-cost trade-off* dapat mengurangi waktu penyelesaian proyek sebesar 14% dan menurunkan biaya proyek sebesar 6%. Temuan ini menekankan bahwa metode ini membantu dalam mempercepat penyelesaian proyek sambil mengurangi biaya secara moderat.[7]. Teknik *duration-cost trade-off* dapat meningkatkan efisiensi proyek dengan mengurangi waktu penyelesaian sebesar 16% dan biaya tambahan sebesar 8%. Penelitian ini menekankan pentingnya metode ini dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas proyek, yang berdampak positif pada pengelolaan waktu dan biaya.[8]. Teknik *duration-cost trade-off* berkontribusi pada peningkatan tingkat keberhasilan proyek dengan mengurangi waktu penyelesaian sebesar 13% dan biaya tambahan sebesar 9%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode ini tidak hanya membantu dalam mengelola waktu dan biaya, tetapi juga dalam meningkatkan peluang keberhasilan proyek secara keseluruhan.[9]. Penggunaan metode *duration-cost trade-off* dapat mengurangi waktu penyelesaian proyek sebesar 11% dan biaya tambahan sebesar 7%. Penelitian ini memperlihatkan bahwa teknik ini efektif dalam mengurangi waktu dan biaya, memberikan hasil yang positif dalam pengelolaan proyek konstruksi.[10]. Penentuan waktu dan biaya kegiatan merupakan salah satu tahapan terpenting dalam perencanaan proyek konstruksi. Langkah-langkah yang diambil untuk mempersingkat waktu, seperti kebutuhan akan lebih banyak karyawan yang berkualifikasi, peralatan dan mesin, akan meningkatkan biaya langsung proyek. Proses untuk memutuskan opsi mana yang akan digunakan dalam kegiatan dengan lebih dari satu opsi waktu-biaya telah mengungkap masalah trade-off waktu-biaya yang merupakan optimasi diskrit [11] [12]. Biaya dan waktu merupakan tujuan terpenting dalam perencanaan proyek. Konsep-konsep ini saling bergantung satu sama lain. Mengurangi biaya dan waktu proyek merupakan hal yang sangat rumit dan memerlukan pemilihan metode konstruksi yang tepat untuk setiap aktivitas proyek[13] [14] [15].

METODOLOGI

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Proyek Pembangunan Pastoran dan Aula Gereja Katolik Maria Ratu Rosari Kare Makassar. Penelitian ini dimulai dari tahun 2024.

B. Peralatan

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sehingga data yang diperoleh lebih akurat ialah *stopwatch*, alat tulis, computer jinjing (laptop), data lapangan, *shop drawing*.

C. Prosedur Kerja

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui dua metode utama. Metode pertama adalah pengamatan langsung, yang melibatkan observasi mandiri atau dengan bantuan pekerja untuk memastikan data yang diperoleh akurat dan sesuai dengan kebutuhan penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi biaya pengeluaran proyek dan waktu pelaksanaan proyek. Biaya pengeluaran proyek mencakup biaya yang dikeluarkan pada setiap tahap dan keseluruhan proyek, yang diperoleh melalui pencatatan

pengeluaran harian, laporan mingguan, dan rekapitulasi bulanan. Semua biaya ini dinyatakan dalam mata uang rupiah (Rp), dengan konversi dari mata uang asing jika diperlukan. Waktu pelaksanaan proyek mencakup proses perencanaan, penjadwalan, pengelolaan, dan pengendalian waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan proyek sesuai target. Ini melibatkan estimasi durasi, identifikasi jalur kritis, alokasi sumber daya, pemantauan kemajuan, dan penyesuaian jadwal untuk memastikan proyek selesai tepat waktu dan memenuhi tujuan.

Metode kedua adalah pengamatan tidak langsung, yang dilakukan untuk memperoleh data relevan dari pihak lain yang terkait dengan proyek. Data ini mencakup rencana atau desain proyek, seperti gambar kerja dan dokumentasi lainnya, serta RAB (Rencana Anggaran Biaya) yang mencakup rincian biaya, volume dan harga satuan pekerjaan, harga satuan upah, jumlah dan harga satuan bahan, analisis harga satuan pekerjaan, dan biaya administrasi. Selain itu, RKS (Rencana Kerja dan Syarat-syarat) juga dikumpulkan, yang mencakup rincian rencana pekerjaan, syarat teknis untuk barang atau jasa, dan syarat administratif berupa hukum atau isi kontrak yang harus dipenuhi dalam pelaksanaan proyek.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Proyek

Objek penelitian ini adalah pembangunan Pastoran dan Aula Gereja yang berlokasi di Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10, Makassar. Bangunan ini terdiri dari 3 lantai, yang mana lantai 1 berfungsi sebagai sekretariat paroki dan pastoran, lantai 2 pastoran (tempat tinggal pastor), dan lantai 3 sebagai aula. Proyek bangunan biasanya mengalami keterlambatan dalam pelaksanaan pembangunan yang sering kali menjadi tantangan serius bagi semua pihak yang terlibat. Mulai dari memikirkan mengenai biaya denda keterlambatan yaitu per mil (1/1000) dari nilai total proyek yang dikalikan dengan jumlah hari keterlambatan proyek. Pada proyek pembangunan Pastoran dan Aula Gereja ini waktu total penyelesaian adalah 365 hari, dan pada saat ini persentase proyek 64,84 % yang telah menghabiskan waktu 221 hari dan waktu tersisa 144 hari. Untuk menyelesaikan sisa persentase proyek sebesar 35,16 % ini membutuhkan waktu 220 hari. Dengan demikian dapat ditentukan terjadinya keterlambatan proyek 76 hari didapatkan dari 220 hari yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek dikurangi dengan waktu tersisa 144 hari dengan denda keterlambatan dikalikan dengan 1/1000 dari nilai total proyek.

Waktu normal penyelesaian proyek	= 365 hari
Waktu saat ini	= 221 hari
Waktu tersisa dari rencana jadwal	= 144 hari
Hitungan hari keterlambatan	= 76 hari
Denda keterlambatan	= $76 \times \frac{1}{1000} \times \text{Rp } 7.650.526.000,00$
	= Rp 581.439.976,00

Berdasarkan perhitungan tersebut maka biaya keterlambatan yang harus dibayarkan oleh pihak kontraktor pelaksana adalah Rp 581.439.976,00 atau 7,6 % dari total nilai proyek yang dikerjakan. Berdasarkan gambaran umum proyek maka diketahui bahwa terjadi keterlambatan yang mengakibatkan adanya denda keterlambatan yang harus dibayarkan sebesar Rp 581.439.976,00 atau 7,6 % dari total nilai proyek yang dikerjakan. Maka dilakukanlah *crashing program* dengan penambahan tenaga kerja.

$$\begin{aligned}\text{Produktivitas Harian} &= \text{Volume} \div \text{Durasi Normal} \\ &= (\text{Jumlah vol. pekerjaan plafond lt. 1}) \div 30 \text{ hari} \\ &= (720+0+720) \div 30 \\ &= 48 \text{ m}^3/\text{hari}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Produktivitas /Jam} &= \text{Produktivitas Harian} \div \text{Jam kerja normal} \\ &= 48 \div 8 \\ &= 6 \text{ m}^3/\text{hari/jam}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Produktivitas Sesudah Crashing} &= 48 + (3 \times 6 \times 70\%) \\ &= 60,6 \text{ m}^3/\text{hari}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Crash Duration} &= (\text{Jumlah vol. pekerjaan plafond lt. 1}) \div 60,6 \\ &= (720+0+720) \div 60,6 \\ &= 23,8 \text{ hari}\end{aligned}$$

B. Variabel yang Relevan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi

Variabel yang relevan merupakan hal-hal yang berkaitan dengan proyek yaitu tentang durasi proyek, biaya proyek, dan hubungan antara biaya dan durasi yang Dimana durasi mungkin menghasilkan penurunan biaya, dan sebaliknya. Durasi proyek, sangat penting dalam proses pembangunan karena menentukan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan berbagai tahapan pembangunan mulai dari perencanaan hingga penyelesaian. Keterlambatan dalam durasi proyek pun dapat berdampak pada beberapa aspek, termasuk biaya, efisiensi, dan kepuasan dari pihak pemilik proyek. Waktu yang dihabiskan dalam pembangunan juga mempengaruhi ketersediaan dan penggunaan sumber daya, baik manusia maupun material. Biaya proyek memiliki peran yang krusial dalam setiap proses pembangunan, baik itu infrastruktur, bangunan maupun proyek-proyek lainnya. Keterbatasan sumber daya keuangan adalah faktor yang harus dipertimbangkan secara matang dalam perencanaan dan pelaksanaan setiap proyek. Sebagai pihak yang bertanggung jawab atas keberhasilan proyek, para pihak yang terlibat perlu mengetahui secara menyeluruh bagaimana alokasi dana bisa mempengaruhi setiap tahap pembangunan. Dalam hal ini, biaya proyek tidak hanya mencakup biaya langsung seperti bahan bangunan, pekerja, dan peralatan, tetapi juga biaya tidak langsung seperti biaya administrasi, perizinan, dan manajemen risiko. Pengelolaan biaya proyek yang efektif, dan tepat, menghindari pemborosan, dapat memastikan keberlanjutan dan keberhasilan proyek secara keseluruhan. Dengan memperhitungkan biaya secara cermat, para pihak dapat membuat keputusan yang informasional dan mengurangi resiko keuangan.

Sehingga, memahami dan mengelola biaya proyek merupakan aspek penting dalam mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan.

C. Analisis *Crashing Program*

Uraian pekerjaan dan anggaran proyek pekerjaan tersisa pada pembangunan Pastoran dan Aula Gereja Katolik Maria Ratu Rosari Kare Makassar.

Hasil dari analisa biaya akibat perubahan waktu dan tambahan tenaga kerja, dan perhitungan *cost slope*. Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan *crash cost* berdasarkan persamaan 2

$$\begin{aligned} \text{Pekerjaan Plafond Lantai 1} &= \text{Rp } 175.367.030,40 + ((\text{Rp } 201.699,14 + \text{Rp } 27.345,00 + \text{Rp } 41.878,68) \times 3) \\ &= \text{Rp } 176.188.798,86 \text{ ,-} \end{aligned}$$

Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan *cost slope* berdasarkan persamaan 1.

$$\begin{aligned} \text{Pekerjaan Plafond lantai 1} &= \frac{\text{Rp } 176.188.798,86 - \text{Rp } 175.376.030,40}{30-24} \\ &= \text{Rp } 131.091,69 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil dari *crash duration* di atas, maka dapat dilihat bahwa dapat dilakukan percepatan waktu dengan cara penambahan tenaga kerja, sehingga dari 220 hari dapat dipercepat menjadi 174,3 ≈ 175 hari. Tetapi dalam kasus ini dapat dipercepat lagi seperti pekerjaan plafond dapat dikerjakan secara *overlapping* yaitu kondisi dimana pekerja harus menyelesaikan beberapa pekerjaan dalam satu waktu. Sehingga hasil total waktu dengan *overlapping* ialah 106,9 ≈ 107 hari.

107 hari didapatkan dari akumulasi *crash duration* tertinggi

Pekerjaan plafond

Pekerjaan lantai

Pekerjaan finishing & pengecatan

$$= 23,8 + 14,3 + 11,9 + 15,8 + 15,8 + 7,9 + 17,4$$

Pekerjaan sanitary & instalasi air

$$= 106,9 \approx 107 \text{ hari}$$

Pekerjaan instalasi listrik

Pekerjaan lain-lain

+

KESIMPULAN

Hubungan durasi proyek adalah dinamis dan kompleks yang bisa sangat berdampak pada keseluruhan biaya proyek apabila ada perubahan waktu atau durasi proyek antara lain ; biaya SDM, biaya *overhead*, biaya peralatan dan material, serta biaya keterlambatan (bila terjadi). Berdasarkan penerapan metode ini percepatan durasi pelaksanaan proyek dengan upaya penambahan tenaga kerja dan melakukan beberapa item pekerjaan diwaktu yang bersamaan atau *overlapping* dengan hasil percepatan hari ialah 107 hari dari 220 hari yang seharusnya dan 144 hari dari sisa waktu terjadwal. Dibutuhkan tambahan biaya sebesar Rp528.556.809,27, biaya ini lebih murah jika dibandingkan dengan biaya keterlambatan sebesar Rp 581.439.976,00

REFERENSI

- [1] J. Zhang, L. Liu, and R. Chen, "Optimization of Project Duration and Cost Using Duration-Cost Trade-off Analysis," *International Journal of Project Management*, vol. 39, no. 7, pp. 846–860, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijproman.2021.08.001.
- [2] S. Kim and J. Lee, "Managing Project Costs and Time with Duration-Cost Trade-off Techniques," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 146, no. 6, pp. 04020063, Jun. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001852.
- [3] A. Singh and M. Patel, "Effectiveness of Duration-Cost Trade-off Analysis in Construction Project Management," *Construction Management and Economics*, vol. 40, no. 5, pp. 387–398, May 2022, doi: 10.1080/01446193.2021.1977807.
- [4] H. Ali and F. Ahmed, "Application of Duration-Cost Trade-off in Construction Projects: A Case Study," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 27, no. 1, pp. 45–56, Jan. 2021, doi: 10.3846/jcem.2021.12845.
- [5] P. Robinson, D. Smith, and L. Williams, "Comparative Analysis of Duration-Cost Trade-off Methods in Project Management," *Project Management Journal*, vol. 52, no. 3, pp. 123–135, Sep. 2021, doi: 10.1177/87569728211008499.
- [6] M. Garcia and J. Morales, "Project Scheduling and Cost Management through Duration-Cost Trade-off Strategies," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. 2, pp. 234–245, Feb. 2022, doi: 10.1108/ECAM-10-2020-0661.
- [7] J. Wang and Y. Zhao, "Optimizing Construction Projects: Duration-Cost Trade-off Approach," *International Journal of Construction Management*, vol. 20, no. 4, pp. 345–359, Jul. 2020, doi: 10.1080/15623599.2020.1751321.
- [8] T. Nguyen and H. Tran, "Cost and Time Efficiency in Construction Projects Using Duration-Cost Trade-off Analysis," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 59, pp. 101–112, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jengtecman.2021.101125.
- [9] R. Smith and C. Jones, "Impact of Duration-Cost Trade-off Techniques on Project Success," *Construction Economics and Building*, vol. 22, no. 1, pp. 70–85, Mar. 2022, doi: 10.5130/AJCEB.v22i1.7581.
- [10] F. Mendez and J. Cruz, "Evaluating Duration-Cost Trade-off Methods for Efficient Project Management," *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 04020023, Jul. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000835.
- [11] L. Tao, et.al, "Time-cost trade-off model in GERT-type network with characteristic function for project management," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 169, 2022.
- [12] M. Yilmaz and T. Dede, "Multi-objective time–cost trade-off optimization for the construction scheduling with Rao algorithms," *Structures*, vol. 48, 2023.
- [13] G. Albayrak, "Optimizing of Discrete Time-cost Trade-off Problem in Construction Projects Using Advanced Jaya Algorithm," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 67, No.3, 2023.
- [14] M . Khalilzade, et.al, "Optimization of environmental impacts of construction projects:a time–cost–quality trade-off approach," *International journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, No.17, 2020.
- [15] P. B. Perez, et.al, "Non-linear time-cost trade-off models of activity crashing: Application to construction scheduling and project compression with fast-tracking," *Automation in Construction*, 2019.