

# Analisis Interoperabilitas *Building Information Modeling* 4D dan *Life Cycle Assessment* Guna Estimasi CO<sub>2</sub> Pekerjaan Struktur Beton Bertulang (Studi Kasus Proyek X di Kota Semarang)

Muhammad Akhzan Kusuma<sup>1\*</sup>, Adinda Adelia Puspita Asri<sup>2</sup>, Hermawan<sup>3</sup>, Jati Utomo Dwi Hatmoko<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Katolik Soegijapranata Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kecamatan Gajahmungkur  
Kota Semarang, Jawa Tengah

Email: [20b10034@student.unika.ac.id](mailto:20b10034@student.unika.ac.id), [20b10058@student.unika.ac.id](mailto:20b10058@student.unika.ac.id)

<sup>2</sup>Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Katolik Soegijapranata Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kecamatan Gajahmungkur  
Kota Semarang, Jawa Tengah

Email: [hermawan.mrk@gmail.com](mailto:hermawan.mrk@gmail.com)

<sup>3</sup>Staf Pengajar Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik  
Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, Kecamatan Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah  
Email: [jati.hatmoko@ft.undip.ac.id](mailto:jati.hatmoko@ft.undip.ac.id)

## ABSTRAK

Indonesia merupakan negara berkembang yang mengalami peningkatan nilai proyek konstruksi secara signifikan setiap tahunnya. Peningkatan nilai proyek konstruksi memberikan dampak negatif terhadap peningkatan gas rumah kaca (GRK). Kontributor utama dalam menghasilkan efek gas rumah kaca (GRK) adalah karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Proyek konstruksi berkontribusi sebesar 39% dari total emisi CO<sub>2</sub> global. Salah satu sumber utama emisi CO<sub>2</sub> dalam tahap pelaksanaan konstruksi adalah pekerjaan struktur beton bertulang. Selain produksi semen dan baja, pekerjaan struktur beton bertulang berkontribusi menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> melalui peralatan konstruksi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengestimasi besar emisi CO<sub>2</sub> pada pekerjaan struktur beton pelat lantai dan balok. Ruang lingkup penelitian ini *gate to gate transportation to site hingga construction/installation process*. Metode penelitian ini dilakukan dengan melakukan interoperabilitas BIM dan LCA. Adapun penelitian ini menggunakan studi kasus dari Proyek Gedung X di Kota Semarang. Penelitian ini dilakukan pada tanggal 7 Juni 2025 hingga 26 Juni 2025, dengan data yang diambil di proyek meliputi *cycle time* penggunaan *tower crane* dan *truck ready mix* pada pekerjaan pengecoran pelat lantai dan balok. Besar emisi CO<sub>2</sub> ini diperoleh dengan menggunakan interoperabilitas BIM dan LCA melalui *plugin* Oneclick LCA. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa estimasi emisi CO<sub>2</sub> pada pelat lantai dan balok lantai 2 dengan besar emisi CO<sub>2</sub> sebesar 5.420 kgCO<sub>2</sub>e. Sumber besar emisi CO<sub>2</sub> tersebut diindikasikan oleh *truck ready mix* dengan *diesel combusted building in machine* dan *tower crane* dengan sumber energi listrik. Tahap selanjutnya hasil penggunaan LCA memberikan rekomendasi penggunaan bahan bakar biodiesel *vegetable oil-based* dan *hydro power*. Dengan demikian dapat diperlihatkan bahwa besar emisi CO<sub>2</sub> dapat dimitigasi dengan melakukan substitusi konsumsi energi.

Kata kunci: emisi CO<sub>2</sub>, interoperabilitas BIM dan LCA, *plugin* Oneclick LCA.

## 1. PENDAHULUAN

Emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan salah satu senyawa dalam gas rumah kaca yang berkontribusi secara signifikan terhadap pemanasan global. Emisi tersebut berasal dari berbagai sektor yaitu, sektor industri, sektor transportasi, dan sektor konstruksi yang menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap peningkatan besar emisi CO<sub>2</sub> global. Berdasarkan data UN *Environment and International Energy Agency* (2017), sektor bangunan dan konstruksi menyumbang sekitar 36% dari konsumsi energi global dan 39% dari total besar emisi CO<sub>2</sub> di dunia. Kondisi tersebut membuktikan bahwa aktivitas konstruksi berperan penting terhadap isu perubahan iklim yang saat ini menjadi perhatian global.

Negara Indonesia mengalami peningkatan nilai konstruksi yang cukup pesat pada setiap tahunnya. Menurut data Badan Pusat Statistik (2023), nilai konstruksi yang diselesaikan pada sektor bangunan sipil mengalami peningkatan yang signifikan dari tahun 2021 hingga tahun 2023. Peningkatan nilai konstruksi tersebut juga mengakibatkan peningkatan besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari konsumsi energi dan material seperti semen dan baja. Berdasarkan *European Commission* dalam laporan *GHG Emission of All World Countries* (2023), Indonesia memiliki peningkatan besar emisi CO<sub>2</sub> sebesar 1,053 gigaton pada tahun 2023 yang dihasilkan dari sektor pembangkit listrik, transportasi, aktivitas konstruksi, dan produksi material (semen dan baja).

Pekerjaan struktur beton bertulang merupakan salah satu aktivitas konstruksi yang memiliki potensi besar dalam

menghasilkan besar emisi CO<sub>2</sub> pada siklus hidup *gate to gate*. Hal tersebut disebabkan oleh penggunaan material semen dan baja dalam jumlah yang besar, serta penggunaan alat berat seperti *tower crane* dan *truck ready mix* selama proses pelaksanaan. Menurut Hermawan, dkk., (2017), pekerjaan pengecoran beton merupakan salah satu tahap yang turut berkontribusi dalam menghasilkan besar emisi CO<sub>2</sub> pada keseluruhan siklus hidup proyek yaitu dengan penggunaan alat berat seperti *tower crane* dan *truck ready mix*. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan untuk mengestimasi serta pengendalian besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan pada tahap pelaksanaan konstruksi.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menilai dampak lingkungan yang dihasilkan dari kegiatan konstruksi adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). Menurut Ortiz, dkk., (2010), *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu produk atau aktivitas. Dalam siklus hidup proyek konstruksi, LCA mampu memberikan pemahaman komprehensif mengenai kontribusi emisi dari setiap tahap pekerjaan. Namun, penerapan LCA memiliki keterbatasan pada ketersediaan dan akurasi data proyek. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi yang dapat menginteroperabilaskan informasi proyek secara langsung dan akurat.

Menurut Jupp (2017), *Building Information Modeling* (BIM) hadir sebagai solusi digital yang mampu menginteroperabilaskan informasi proyek konstruksi secara visual dan terstruktur. Melalui model BIM 4D, data volume dan durasi pekerjaan dapat dihubungkan sehingga memungkinkan analisis kuantitatif terhadap emisi berdasarkan waktu dan aktivitas aktual di lapangan. Interoperabilitas BIM dan LCA memungkinkan proses estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> yang dapat dilakukan secara otomatisasi dan efisien dengan memanfaatkan data dari model BIM sebagai input dalam perhitungan estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> pada LCA.

Penelitian ini berfokus pada interoperabilitas BIM 4D dan LCA untuk mengestimasi besar emisi CO<sub>2</sub> pada pekerjaan struktur beton bertulang dengan studi kasus pada Proyek X di Kota Semarang. Hasil interoperabilitas BIM dan LCA diharapkan dapat memberikan informasi mengenai besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan pada tahap pelaksanaan konstruksi, serta menjadi dasar dalam merumuskan pengurangan besar emisi CO<sub>2</sub> di masa mendatang.

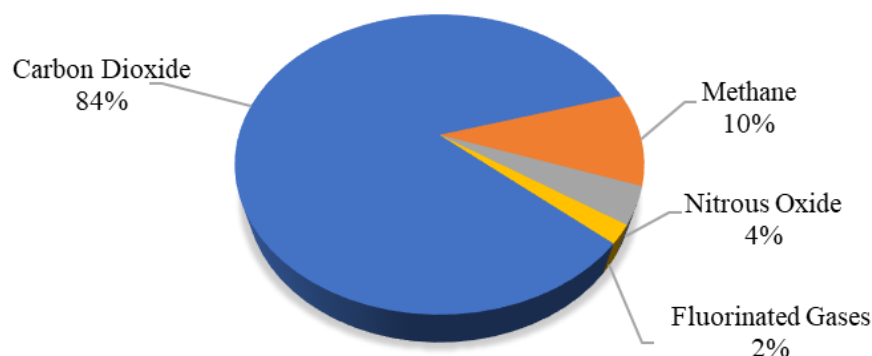
## 2. TUJUAN

Tujuan tulisan ini adalah untuk melakukan estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan pada tahapan pelaksanaan pengecoran struktur beton bertulang pelat lantai dan balok. Ruang lingkup penelitian ini adalah *gate to gate transportation to site hingga construction/installation process*.

## 3. KAJIAN PUSTAKA

### Emisi CO<sub>2</sub>

Menurut Hanaki dan Ichinose (1995) emisi CO<sub>2</sub> merupakan pelepasan senyawa gas CO<sub>2</sub> ke lapisan atmosfer bumi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil sebagai kontributor terbesar gas rumah kaca. Terdapat beberapa senyawa gas rumah kaca yang meliputi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), nitrogen dioksida (N<sub>2</sub>O), hidrofluorokarbon (HFC<sub>s</sub>), perfluorokarbon (PFC<sub>s</sub>), dan sulfur heksafluorida (SF<sub>6</sub>).

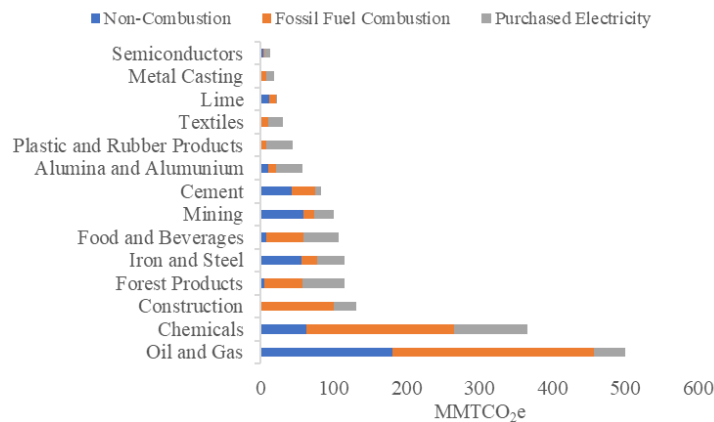


Sumber: Diunduh dari situs internet [www.epa.gov/climatestudents](http://www.epa.gov/climatestudents)

Gambar 1. Persentase Gas Rumah Kaca di Bumi

Saat ini, emisi CO<sub>2</sub> menjadi kontributor utama terhadap pemanasan global dibandingkan dengan gas rumah kaca lainnya (Li dan Zheng, 2019). Emisi CO<sub>2</sub> dihasilkan dari berbagai sumber seperti kegiatan transportasi, dan berbagai sektor industri. Berdasarkan dari berbagai sumber yang berkontribusi dalam menghasilkan besar emisi CO<sub>2</sub>, sektor industri merupakan salah satu sumber kontributor emisi CO<sub>2</sub> cukup besar dan berpengaruh pada pemanasan global.

Selain itu, sektor konstruksi juga menjadi salah satu indikator penghasil besar emisi CO<sub>2</sub> dari berbagai macam sektor. Pemetaan sumber emisi CO<sub>2</sub> dari berbagai macam sektor industri diperlihatkan pada Gambar 2.



Sumber: Truitt, 2009

Gambar 2. Pemetaan Sumber Emisi CO<sub>2</sub> di Amerika Dari Berbagai Macam Industri

Sektor konstruksi memang tidak menjadi kontributor utama emisi CO<sub>2</sub>, namun jika dilihat dari segi kuantitas jumlah besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan tetap signifikan. Oleh karena itu, sebagian besar negara berupaya untuk melakukan mitigasi besar emisi CO<sub>2</sub> (Sun dan Wang 1996; Zhiqi 1997; Seo dkk., 1998a)

### Pekerjaan Pengecoran Beton Bertulang

Beton bertulang merupakan material konstruksi yang sering digunakan dalam pembangunan. Lebih dari 25 miliar ton beton diproduksi setiap tahunnya di seluruh dunia yang menyebabkan konsumsi semen global mencapai 2,9 miliar ton per tahun (Chana, 2011). Menurut penelitian Hermawan, dkk., (2017), tahapan pekerjaan struktur beton bertulang memiliki kontribusi dalam menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> dengan penggunaan peralatan konstruksi seperti *tower crane* dan *truck ready mix*. Oleh karena itu, diperlukan cara meminimalisir besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari alat berat konstruksi yaitu dengan mencari substitusi konsumsi energi bahan bakar minyak (BBM) dan bahan bakar fosil yang digunakan alat berat.

*Biofuel* merupakan bahan bakar yang cocok untuk mengatasi masalah energi karena terdapat beberapa kelebihan. Kelebihan dari *biofuel* yaitu dapat diperbarui, bersifat ramah lingkungan, dapat terurai, mampu memitigasi efek gas rumah kaca, dan terjaminnya kontinuitas bahan baku. Pemerintah juga mewajibkan minimal penggunaan *biofuel* di beberapa sektor dan pembangkit listrik bertahap termasuk biodiesel. Biodiesel merupakan Bahan Bakar Minyak (BBM) yang diperoleh dari hasil pengolahan bahan nabati (Wibowo, dkk., 2019).

### Building Information Modeling (BIM)

Menurut Kementerian PUPR (2018), *Building Information Modeling* (BIM) merupakan teknologi yang digunakan untuk merancang, membangun, dan mengelola bangunan dengan menggunakan model digital yang berisi informasi mengenai elemen – elemen bangunan. Runtutan siklus konstruksi dengan menggunakan BIM diperlihatkan pada Gambar 3.



Sumber: Kementerian PUPR, 2018

Gambar 3. Siklus Konstruksi Dengan Menggunakan BIM

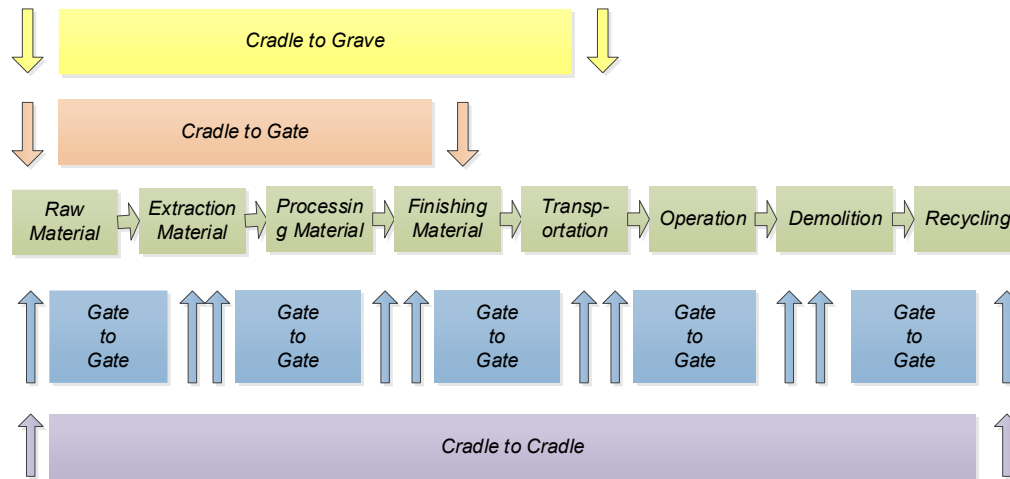
Menurut Martin, dkk., (2019), konsep BIM yang diterapkan untuk mengukur tingkat penerapan BIM pada suatu proyek konstruksi dapat disebut dengan *maturity level*. BIM *maturity level* digunakan untuk mengukur tingkat interoperabilitas antara model yang digunakan pada BIM. Berikut merupakan 4 tingkatan BIM *maturity level*:

- Level 0: disebut dengan pra-BIM karena pemodelan BIM dikerjakan secara terpisah
- Level 1: BIM 3D sudah digunakan pada proyek namun tidak dibagi secara eksternal
- Level 2: BIM 3D telah ter interoperabilitas dengan 4D dan 5D
- Level 3: Interoperabilitas BIM 4D, 5D, dan 6D.

### Life Cycle Assessment (LCA)

Berdasarkan ANSI/ISO 14040, *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan metode untuk melakukan penilaian terhadap aspek lingkungan pada suatu kegiatan dari sebuah produk atau jasa. LCA mempelajari aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan dari tahap *raw material*, proses produksi, penggunaan produk, dan disposasi dari produk tersebut. LCA memiliki ruang lingkup siklus hidup yang akan diperlihatkan pada Gambar 4 dan dijabarkan sebagai berikut:

- Cradle to grave*: Tahapan yang dimulai dari proses manufaktur hingga ke tempat pembuangan
- Cradle to gate*: Tahapan yang hanya dimulai dari proses manufaktur hingga sebelum proses pengoperasian produk
- Cradle to cradle*: Tahap ini hanya meninjau siklus hidup produk dari proses manufaktur hingga daur ulang
- Gate to gate*: Tahapan yang meninjau kegiatan terdekat, sehingga menjadi ruang lingkup LCA terpendek.



Sumber: Hermawan, dkk., 2013  
Gambar 4. Ruang Lingkup Pada LCA

### Model Formula Konsumsi Energi

Konsumsi energi alat berat menggunakan model formula matematis yang diformulasikan oleh Zhang, dkk., (2025). Adapun perhitungan konsumsi energi yang dibutuhkan oleh *tower crane* dapat diperoleh dari persamaan:

$$E = \frac{P}{t} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{\eta_{sys}} (P_{hoist} \times LF_{hoist} + P_{trolley} \times LF_{trolley} + P_{slew} \times LF_{slew} + P_{travel} \times LF_{travel} + P_{aux}) \quad (2)$$

$$LF_x = \frac{t_x}{t_{siklus}} \quad (3)$$

Dengan  $E$  = energi Listrik,  $P$  = daya listrik *tower crane*,  $t$  = waktu operasi *tower crane*,  $\eta_{sys}$  = efisiensi sistem (0,8),  $P_{hoist}$  = daya listrik yang dibutuhkan mekanisme *hoist*,  $LF_{hoist}$  = persentase total waktu penggunaan *hoist* terhadap total waktu siklus,  $P_{trolley}$  = daya listrik yang dibutuhkan mekanisme *trolley*,  $LF_{trolley}$  = persentase total waktu penggunaan *trolley* terhadap total waktu siklus,  $P_{slew}$  = daya listrik yang dibutuhkan oleh mekanisme *slew*,  $LF_{slew}$  = persentase total waktu penggunaan *slew* terhadap total waktu siklus,  $P_{travel}$  = daya listrik yang dibutuhkan mekanisme *travel*,  $LF_{travel}$  = persentase total waktu penggunaan *travel* terhadap total waktu siklus,  $P_{aux}$  = daya listrik yang dibutuhkan seperti penerangan yang digunakan *tower crane*,  $t_x$  = total waktu penggunaan mekanisme,  $t_{siklus}$  = total waktu durasi siklus

*tower crane*.

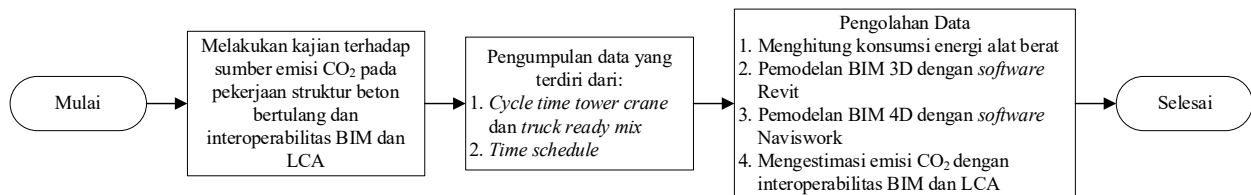
Adapun konsumsi energi yang dibutuhkan oleh *truck ready mix* yaitu perhitungan kebutuhan Bahan Bakar Minyak (BBM) solar dapat menggunakan formula matematis yang diformulasikan oleh Rostiyanti (2014). Berikut konsumsi BBM dari mesin diesel *truck ready mix* dapat diperoleh dari persamaan:

$$\text{BBM} = 0,04 \times \text{HP} \times \text{eff} \quad (4)$$

Dengan BBM = bahan bakar solar yang dibutuhkan oleh *truck ready mix*, HP = kapasitas mesin diesel, eff = faktor efisiensi (60%).

#### 4. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Metode Penelitian

Berdasarkan Gambar 5, maka dapat dijabarkan sebagai berikut: metode penelitian dimulai dengan melakukan kajian terhadap sumber emisi CO<sub>2</sub> pada pekerjaan struktur beton bertulang dan melakukan interoperabilitas BIM dan LCA. Adapun data yang dibutuhkan terdiri dari *cycle time tower crane* dan *truck ready mix*, serta *time schedule*. Survei dilaksanakan di Kota Semarang dengan obyek penelitian pada Proyek X Gedung lantai 1 hingga lantai 6. Berdasarkan data tersebut maka dilakukan pengolahan data yang meliputi proses menghitung konsumsi energi alat berat, pemodelan BIM 3D, pemodelan BIM 4D, serta mengestimasi besar emisi CO<sub>2</sub> dengan interoperabilitas BIM dan LCA.

#### 5. PEMBAHASAN

Hasil estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> dengan menggunakan Interoperabilitas BIM dan LCA melalui *plugin* Oneclick LCA pada Autodesk Revit. Hasil estimasi tersebut berdasarkan dari BIM 4D dan alat berat yang digunakan selama tahapan konstruksi berlangsung. Spesifikasi setiap alat berat diperoleh berdasarkan dari spesifikasi yang disediakan oleh produsen alat berat tersebut. Adapun *tower crane* menggunakan merk zoomlion dengan tipe TC7527-16D (QTZ250), dengan daya *hoist* utama 60 kW, daya motor *trolley* 11 kW, daya motor *slew* 15 kW, panjang lengan 75 m, dan *max load* sebesar 16 ton. *Truck ready mix* menggunakan merk Hino dengan tipe 500 seri FM260JD, dengan tipe mesin 6 silinder *inline*, hp/rpm 260/2500, maksimum kecepatan 77 km/jam. Berdasarkan data tersebut, maka diperoleh hasil estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> yang dapat dilihat pada Tabel 1, serta Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.

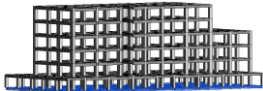





Result category		Global warming kg CO <sub>2</sub> e
A1-A3 ?		1,28E+05
+ A4 ?		1,41E+03
+ A5 ?		5,42E+03

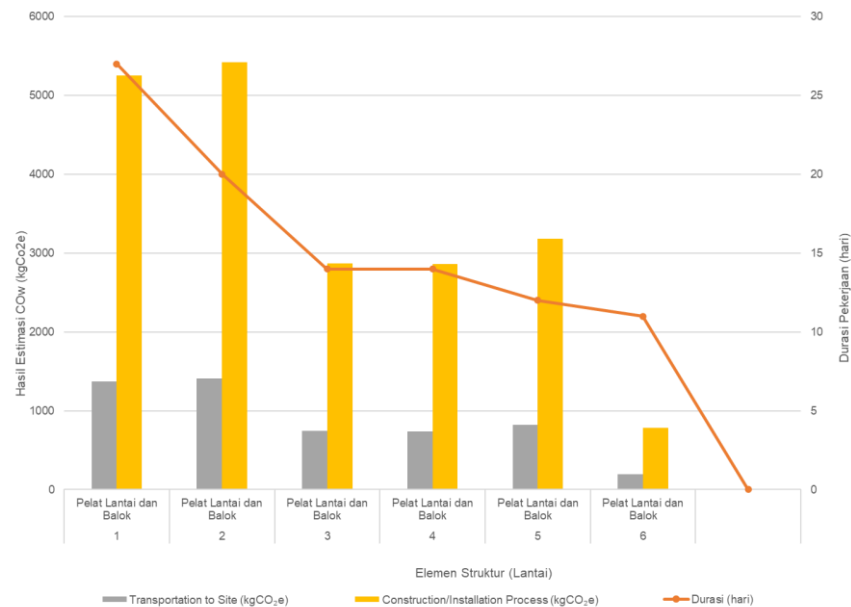
Sumber: <https://urlbity.com/c03>

Gambar 6. Hasil Estimasi Besar Emisi CO<sub>2</sub> Berdasarkan *Plugin* Oneclick LCA

Tabel 1. Hasil Estimasi Besar Emisi CO<sub>2</sub> yang Dihasilkan Pada Tahapan Pekerjaan Pengecoran Beton Bertulang Proyek X

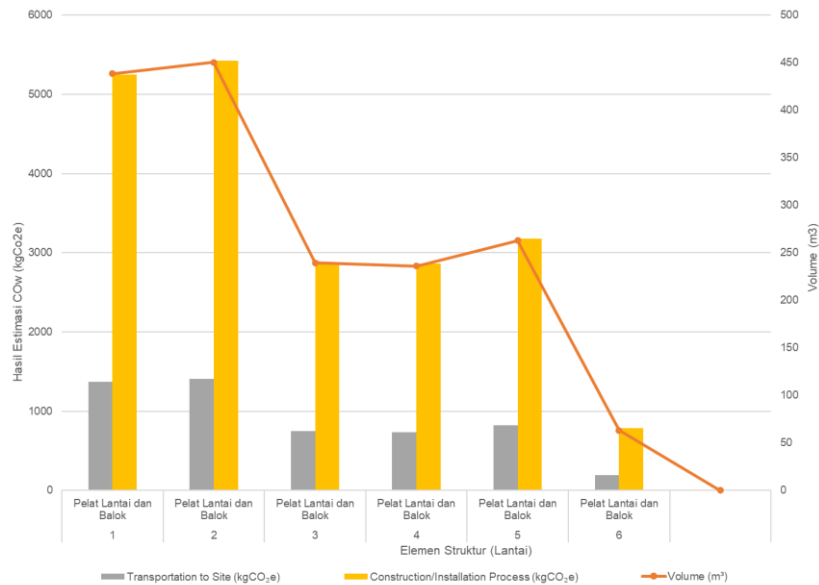
Lantai	Gambar	Pekerjaan Pengecoran	Time Schedule		Result Category	(kgCO <sub>2</sub> e)
			Start	Finish		
1			15/05/25	10/06/25	Transportation to site	1.370

		Pelat Lantai dan Balok			Construction/installation process	5.250
2		Pelat Lantai dan Balok	07/06/25	26/06/25	Transportation to site Construction/installation process	1.410 5.420
3		Pelat Lantai dan Balok	28/06/25	11/07/25	Transportation to site Construction/installation process	747 2.870
4		Pelat Lantai dan Balok	19/07/25	01/08/25	Transportation to site Construction/installation process	738 2.860
5		Pelat Lantai dan Balok	09/08/25	20/08/25	Transportation to site Construction/installation process	820 3.180
6		Pelat Lantai dan Balok	27/08/25	06/09/25	Transportation to site Construction/installation process	197 785



Gambar 6. Hasil Estimasi Besar Emisi CO<sub>2</sub> Terhadap Waktu Durasi Pekerjaan (hari)





Gambar 7. Hasil Estimasi Besar Emisi CO<sub>2</sub> Terhadap Volume (m<sup>3</sup>)

Berdasarkan Gambar 6, durasi pekerjaan struktur pelat lantai dan balok lantai 2 dimulai pada tanggal 7 Juni 2025 dan berakhir pada tanggal 26 Juni 2025 dengan total durasi pekerjaan 20 hari. Hasil estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> pada pekerjaan struktur beton pelat lantai dan balok lantai 2 menghasilkan sebesar 5.420 kgCO<sub>2</sub>e. Demikian pula pada Gambar 7, diperlihatkan hasil estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> pada pelat lantai dan balok lantai 2 menghasilkan sebesar 5.420 kgCO<sub>2</sub>e. Hal ini diindikasikan oleh perbedaan total volume pada setiap lantai dan durasi pelaksanaan pengecoran. Perbedaan volume dan durasi pelaksanaan menjadi penentu besar emisi CO<sub>2</sub> seperti yang dinyatakan oleh Peng, dkk., (2023) dan Hu, dkk., (2023).

## 6. KESIMPULAN

- Interoperabilitas BIM dan LCA dengan menggunakan *plugin* Oneclick LCA melalui Autodesk Revit berhasil diterapkan untuk melakukan estimasi besar emisi CO<sub>2</sub>. Pada *result category construction/installation process* pengecoran beton bertulang struktur pelat lantai dan balok lantai 2 menghasilkan estimasi besar emisi CO<sub>2</sub> terbesar yaitu 5.420 kgCO<sub>2</sub>e.
- Melalui hasil tersebut diperoleh bahwa konsumsi energi yang digunakan pada *truck ready mix* dan *tower crane* sangat berpengaruh pada hasil estimasi besar emisi CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu, diperoleh rekomendasi konsumsi energi dengan mensubstitusikan solar dengan biodiesel *vegetable-oil* dan mensubstitusikan listrik berbahan bakar fosil dengan *hydro power* untuk meminimalisir besar emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari penggunaan alat berat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik (BPS). (2022): *Statistik Konstruksi (Construction Statistics)*, ISSN: 1978-9149, Nomor Publikasi 05300.2333, Katalog: 6301003, Jakarta.
- Hanaki, K., dan Ichinose, M. (1995): Global environmental issues and the role of environmental engineering. *Water Science and Technology*, 31(8), 1–10.
- Hermawan (2017): Pengembangan model jejak karbon pada pelaksanaan pekerjaan struktur atas beton bertulang untuk konstruksi bangunan tingkat tinggi di Indonesia, *Disertasi Program Teknik Sipil Pengutamaan Manajemen dan Rekayasa Konstruksi*, Institut Teknologi Bandung.
- Hermawan, (2013): Pembagian model jejak karbon ada pelaksanaan pekerjaan struktur atas beton bertulang untuk konstruksi bangunan tingkat tinggi di Indonesia *dalam* Djoa, J. dan Yuwono, J. (2021) : Penggunaan building information modeling terhadap life cycle assessment pada pekerjaan pembetonan struktur atas proyek x di Semarang untuk estimasi CO<sub>2</sub> dan costing.
- Hu, H., Li, C., Xu, Z., Gui, Y., Zong, L., & Shi, J. (2023): *Calculation example of full cycle carbon emission of super deep foundation pit and carbon reduction measures. Low-Carbon Materials and Green Construction*, 1(11), 1–14.
- Jupp, J. (2017): 4D BIM for environmental planning and management. *Procedia Engineering*, ISSN: 1877-8058. 180 (2017), 190–201.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, (2018): Pemodelan 3D, 4D, 5D, 6D, dan 7D serta simulasinya dan *Level of Development (LoD)*, *Pelatihan Perencanaan Konstruksi Dengan Sistem Teknologi Building*.
- Li, W., dan Zheng, G. (2019): The impact of CO<sub>2</sub> emissions on global warming: evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 9233-9246.
- Martin, P., Beladjine, D., dan Beddiar, K. (2019): Evolution within the maturity concept of BIM. *WIT Transactions on the Built Environment*. E-ISSN: 1743- 3509. 192(12), 131-142.
- Ortiz, O., Pasqualino, J. C., Díez, G., dan Castells, F. (2010): The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (11), 832- 840.
- Peng, J., Feng, Y., Zhang, Q., & Liu, X. (2023): *Multi-objective integrated optimization study of prefabricated building projects introducing sustainable levels. Scientific Reports*, 13(1), 2821.(5)
- Rostiyanti, S. F. (2014): *Alat berat untuk proyek konstruksi*, Jakarta: Rineka Cipta, ISBN 978-979-518-850-6. 17-25.
- Samiaji, T. (2011): Gas CO<sub>2</sub> di wilayah Indonesia, *Berita Dirgantara*, ISSN: 1978- 8096. 12 (2), 68- 75.
- Seo, S., dan Hwang, Y. (2011): Assessment of the embodied CO<sub>2</sub> emission per floor area of buildings using the life cycle CO<sub>2</sub> assessment method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(11), 1011–1020.
- Sudjono, P. dan Yudhi, C.O. (2011): Estimation of CO<sub>2</sub> emission from development of various sizes of low-cost house, *Jurnal Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung*, ISSN: 1319-2380. 17(2), 98–109.
- Truitt, P. (2009): *Potential for reducing greenhouse gas emission in the construction sector*, National Construction Sector Lead, Pennsylvania, USA. 1-45.
- UN Environment and International Energy Agency (2017): *Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global status report 2017*. United Nations Environment Programme. Diperoleh dari situs internet: <https://globalabc.org/uploads/media/default>.
- Wibowo, A., Febriansyah, H., & Suminto. (2019): *Pengembangan standar biodiesel B20 mendukung implementasi diversifikasi energi nasional. Jurnal Standardisasi*, 21(1), 55–66.
- Zhiqi, C. (1997): Negotiating an agreement on global warming: A theoretical analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32(2), ISBN: 978-1-315-20231-0, 170-188.