



MK-21 PEMILIHAN MATERIAL BANGUNAN BEREMISI KARBON RENDAH DENGAN INTEGRASI *BUILDING INFORMATION MODELLING* (BIM)

Fuk-Jin OEI^{1*}, Mohamad-Heri SUKANTARA²

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta 11440
e-mail: fukjin@ft.untar.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil dan Infrastruktur, Politeknik Astra, Jl. Gaharu Blok F-3, Delta Silicon 2,
Cikarang Selatan, Bekasi, Jawa Barat 17530
e-mail: mhsukantara@gmail.com

ABSTRAK

Pemanasan Global adalah masalah yang menjadi polemik dunia yang salah satu penyumbang terbesarnya adalah industri konstruksi. Dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dan dibantu dengan penerapan *Building Information Modelling* (BIM) sebagai salah satu kemajuan teknologi saat ini, maka dampak pemanasan global dapat diperkirakan. Berdasarkan 4 alternatif kombinasi material yang direncanakan untuk pembangunan asrama kampus tahap 2 yang mencakup pekerjaan struktur dan arsitektur dinding, dilakukanlah analisis dari aspek biaya, aspek emisi CO₂ pada fase konstruksi dan operasional bangunan sebagai tujuan dari penelitian ini. Rekomendasi yang diajukan dengan mempertimbangkan seluruh alternatif kombinasi material tersebut adalah tipe 1, yaitu menggunakan struktur beton *cast in place*, *façade* bata merah, *interior* bata ringan dengan nilai emisi CO₂ fase konstruksi sebesar 1.844.193,76 KgCO₂eq/tahun dan biaya sebesar Rp 26.470.191.605, serta emisi CO₂ fase operasional sebesar 415.705,14 KgCO₂eq/tahun.

Kata kunci: Emisi bangunan, Emisi CO₂, *Life Cycle Assessment*, *Building Information Modelling*, *Autodesk Revit*

PENDAHULUAN

Saat ini pemanasan global menjadi topik yang hangat dibicarakan karena efeknya sangat terasa di kehidupan sehari-hari dengan adanya perubahan iklim yang tiba-tiba dan tidak dapat diprediksi sebelumnya. Salah satu kontribusi terjadinya pemanasan global ini adalah besarnya kandungan emisi karbon CO₂ yang dihasilkan dari industri, baik industri manufaktur, maupun industri konstruksi (Ervianto, 2015). *United Nations Environment Programme* (UNEP) dalam laporannya tahun 2022 (UNEP, 2022) mendesak seluruh negara di dunia untuk melakukan tindakan yang lebih khusus dalam rangka penurunan produksi karbon di berbagai industri, termasuk salah satunya adalah industri konstruksi. Itu dikarenakan penggunaan material dalam konstruksi merupakan salah satu sumber emisi CO₂ (Bribian, 2011).

Untuk mengidentifikasi nilai emisi CO₂ pada material konstruksi yang dipakai digunakanlah metode *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA merupakan salah satu cara untuk mengetahui siklus penggunaan material suatu produk yang diidentifikasi dari awal (*raw material*) hingga akhir untuk mengetahui dampak yang ditimbulkannya (Zabalza, et.al., 2009). Sementara itu, penerapan teknologi *Building Information Modeling* (BIM) dapat membantu menganalisis emisi karbon dari gedung yang akan dibangun karena informasi semua elemen bangunan dapat direpresentasikan didalam BIM (Munawir, 2021; Lu dan Wang, 2019; Mousa, et.al., 2016).

Dengan latar belakang niat untuk berperan dalam penurunan emisi karbon di Indonesia dan ketersediaan teknologi yang ada, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan rekomendasi alternatif kombinasi material konstruksi gedung asrama sebuah kampus ditinjau dari aspek emisi CO₂ yang dihasilkan dengan biaya konstruksi yang rendah.

TINJAUAN TEORI

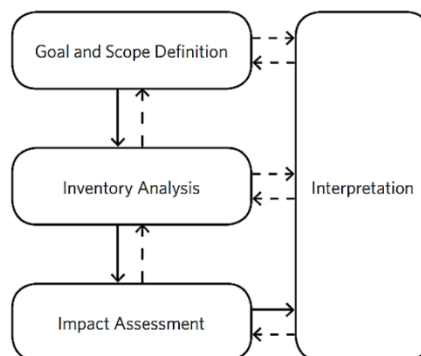
Life Cycle Assessment (LCA) adalah sebuah teknik yang digunakan untuk melakukan penilaian terhadap dampak lingkungan yang berhubungan dengan suatu produk dengan cara menyusun dan membuat inventarisasi masukan dan keluaran yang berhubungan dengan produk tersebut. Evaluasi terhadap potensi dampak lingkungan yang berhubungan dengan masukan dan keluaran tersebut dilakukan dengan menafsirkan hasil analisis inventaris dan fase penilaian dampak dalam kaitannya dengan tujuan penelitian (ISO, 1997). LCA mempertimbangkan siklus hidup suatu produk dari bahan mentah, prosesnya, sampai akhir dari kegunaan produk tersebut dan pembuangannya. Hal ini sering disebut dengan *Cradle to grave* (ISO, 1997; Hermawan, et.al., 2013).

Menurut ISO 14040, LCA dapat membantu untuk beberapa aspek diantaranya adalah pertama, mengidentifikasi peluang untuk meningkatkan aspek lingkungan dari produk di berbagai titik dalam siklus kehidupan. Kedua, pengambilan keputusan dalam industri, organisasi pemerintah atau non pemerintah (misalnya strategi perencanaan, pengaturan prioritas, desain produk atau proses atau *redesign*). Ketiga, pemilihan indikator kinerja lingkungan yang relevan, termasuk teknik pengukuran. Keempat, pemasaran (misalnya klaim lingkungan, skema *ecolabelling* atau deklarasi produk lingkungan).

Sementara itu, LCA dapat diaplikasikan pada spektrum yang lebih luas yang semuanya berdasarkan ISO 14040 dan ISO 14044. Jadi, selain *cradle to grave*, dengan pertimbangan yang benar, LCA dapat juga diaplikasikan pada studi-studi berikut:

1. Studi *cradle to gate* yang ruang lingkupnya dimulai dari *raw material* sampai dengan *gate* sebelum proses operasi.
2. Studi *gate to gate* yang ruang lingkupnya dimulai dari satu *gate* sampai ke *gate* berikutnya. Studi ini adalah studi terpendek karena hanya meninjau kegiatan yang berdekatan.
3. Studi *cradle to cradle* yang ruang lingkupnya dimulai dari *raw material* sampai dengan daur ulang (*recycling*) material tersebut.

Menurut ISO 14040, fase LCA meliputi hal-hal dapat dilihat pada gambar 1 dibawah ini:



Gambar 1. Fase dalam LCA (sumber: ISO 1997)

Berkaitan dengan *Building Information Modelling (BIM)*, konsep BIM sudah ada sejak tahun 1970-an di Amerika Serikat (USA). Kemudian pada tahun 1985 muncul terminologi *Building Model* oleh Simon Ruffle dan Robert Aish. Kemudian pada tahun 1987 muncul ArchiCAD Graphisoft sebagai implementasi pertama dari BIM. Pada tahun 1992 muncul terminologi BIM dalam makalah G.A. Van Nederveen dan F.P. Tolman. Pada tahun 2001 BIM pertama kali masuk dan diperkenalkan di Tiongkok. Kemudian pada tahun 2002, Autodesk mulai mengadopsi BIM pada *software* mereka. Pada tahun 2003 muncul Bentley Systems “*Integrated Project Models*” dan Graphisoft “*Virtual Building*”. Di tahun 2007 BIM mulai diwajibkan di Amerika untuk proyek-proyek besar (*major projects*). Di tahun 2011, BIM mulai diperkenalkan di Inggris (UK) dan mulai diterapkan di Tiongkok. Tahun 2012, BIM diperkenalkan dan diterapkan di Korea, Denmark, dan Belanda. Tahun 2013, Singapura telah mewajibkan penerapan BIM melalui *e-submission*



pada seluruh proyek bangunan gedung baru. Tahun 2016, BIM pertama kali masuk ke Vietnam, Norway, dan Italia. Tahun 2017, BIM mulai diperkenalkan dan diterapkan di Indonesia oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Qatar, Jerman, Mexico, Perancis, Rusia, dan Skotlandia.

Pemerintah melalui Kementerian PUPR saat ini mulai menerapkan sistem BIM yang bisa dikatakan baru untuk berkontribusi dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. BIM dipercaya mampu memberikan kontribusi dan manfaat yang besar terhadap dampak perubahan iklim (Munawir 2021). Sebelumnya, dalam diskusi di acara pameran teknologi infrastruktur oleh Direktur Bina Penyelenggaraan Jasa Konstruksi, Putut Marhayudi menjelaskan mengenai Peraturan Menteri PUPR Republik Indonesia Nomor 22/PRT/M/2018, yaitu tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara yang mewajibkan penerapan BIM pada bangunan gedung negara tidak sederhana dengan kriteria luas di atas 2000 m² dan di atas dua lantai. Adapun hasil keluarannya merupakan hasil desain menggunakan BIM. Begitu pula Undang-Undang No. 2 tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi, pasal 5 ayat (5) menyatakan bahwa, pemerintah pusat memiliki kewenangan dalam mengembangkan standar material dan peralatan konstruksi, serta inovasi teknologi konstruksi. Seiring dengan adanya standar BIM yaitu ISO 19650, peraturan tersebut dikembangkan menjadi Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 16 Tahun 2021 yang merupakan peraturan pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, dan sesuai dengan bunyi Pasal 24 dan Pasal 185 huruf b Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2020.

METODE PENELITIAN

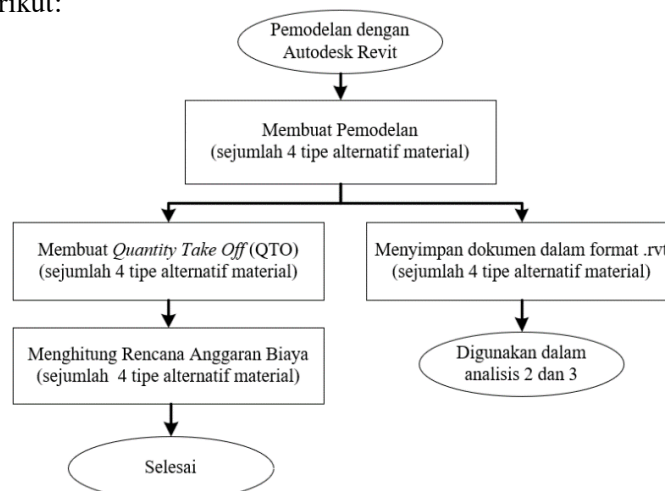
Adapun objek penelitian yang diambil adalah salah satu bangunan dari sebuah universitas di Cikarang yang berfungsi sebagai asrama. Sementara itu, lingkup penelitian hanya meliputi tahap pelaksanaan konstruksi dan operasional saja. Data yang dikumpulkan adalah *as-built drawing* berbasis non-BIM dari *existing* gedung kembarnya, rencana kerja dan syarat (RKS), harga satuan pekerjaan (HSP), dan indeks koefisien pekerjaan berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat no. 1 Tahun 2022. Ada empat (4) alternatif kombinasi material yang diteliti dan ditunjukkan pada tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Alternatif Kombinasi Material

Alternatif	Pekerjaan Struktur	Pekerjaan Arsitektur Facade	Pekerjaan Arsitektur Interior
Tipe 1	Beton <i>cast-in-place</i>	Bata merah	Bata ringan
Tipe 2	Beton <i>cast-in-place</i>	<i>Precast</i> panel	Bata ringan
Tipe 3	Beton <i>precast</i>	Bata merah	Bata ringan
Tipe 4	Beton <i>precast</i>	<i>Precast</i> panel	Bata ringan

Langkah 1

Langkah awal adalah membuat model BIM 3 dimensi dengan bantuan *Autodesk Revit*. Pemodelan ini dibuat dengan empat alternatif kombinasi material diatas. Dengan berbekal keempat pemodelan tersebut, volume pekerjaan dapat diperoleh dengan melakukan *quantity take-off* (QTO) dan volume tersebut digunakan untuk perhitungan rencana anggaran biaya (RAB) dari ketiga pekerjaan yang ditinjau. Untuk jelasnya, dapat dilihat pada diagram berikut:



Gambar 2. Tahapan Langkah 1

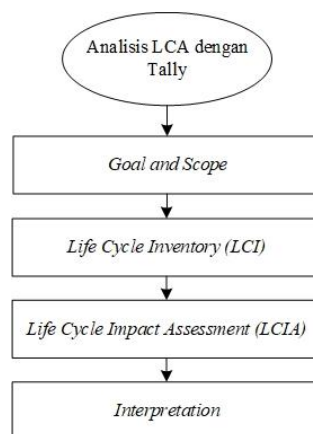
Langkah 2

Langkah berikut adalah menghitung emisi CO₂ dengan metode *Life Cycle Assessment (LCA)* dengan bantuan *Plugin Tally Revit*. Adapun parameter yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini:

Tabel 1. Parameter Tally Revit

No.	Pengaturan	Detail Pengaturan	Parameter
1	<i>Objective of Study</i>	<i>Define building type and materials</i>	<i>Type: Full building study Sections: Stairs, Structure, Walls Material properties: alternative type 1/2/3/4</i>
2	<i>Project Browser</i>	<i>Railing</i>	<i>Galvanized steel pipe, finished epoxy coating</i>
		<i>Stairs</i>	<i>Cast in place concrete 4000 psi Precast concrete 4000 psi</i>
		<i>Structural Column</i>	<i>Cast in place concrete 4000 psi Precast concrete 4000 psi Steel C-H stud metal forming</i>
		<i>Structural Foundation</i>	<i>Cast in place concrete 4000 psi</i>
		<i>Structural Frame</i>	<i>Cast in place concrete 4000 psi Precast concrete 4000 psi Steel C-H stud metal forming</i>
		<i>Walls</i>	<i>Brick generic 21 x 10 x 5 Brick generic 20 x 60 x 10 Precast concrete structural panel With mortar type N, thickset mortar</i>
3	<i>Report Details</i>	<i>Report Information</i>	<i>Gross building: 6.468 m2 Expected building life: 50 years</i>
		<i>Transportation Distances</i>	<i>By trucks with maximum distance of 100 km (2-ways)</i>
		<i>Output Summary</i>	<i>Bill of Materials, Contribution Assessments</i>
4	<i>Save</i>	<i>Report Saved</i>	<i>Save in Excel dan Pdf formats</i>

Tahapan dari metode LCA dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini. Selanjutnya, hasil perhitungan dengan metode LCA dibandingkan dengan perhitungan manual untuk mendapatkan deviasi dari kedua perhitungan tersebut.



Gambar 3. Tahapan *Life Cycle Assessment*

Langkah 3

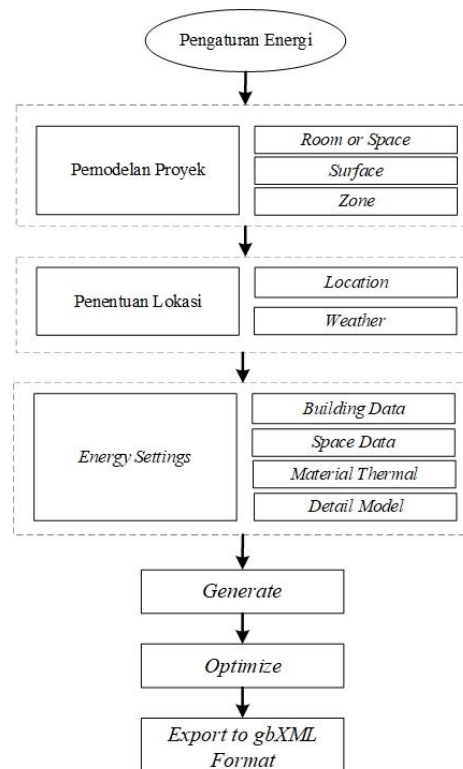


Langkah berikutnya adalah pada saat operasional gedung dengan menghitung emisi CO₂ yang dihasilkan oleh penggunaan listrik setelah bangunan selesai. Selain menggunakan bantuan *software Revit*, perhitungan juga diintegrasikan dengan *software berbasis web Green Building Studio (GBS)*. Adapun parameter yang digunakan, dapat dilihat pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Parameter Tally Revit

No.	Pengaturan	Detail Pengaturan	Parameter
1	Setting electrical cost	Cost per unit kWh	Rp. 1.553,85 (source: invoice of August 2022)
2	Space	Condition type	Cooled (due to installed air condition)
		Space type	Dormitory bedroom
		Electrical type (Formula LPD and EPD)	Lighting power density: 32.2917 Equipment power density: 1011.81
		Area per person	43.0556 feet ² /person (4 m ²)
		Design temperature	84.2° Fahrenheit (29° Celcius)
3	Zone	Cooling on site point	84.2° Fahrenheit (29° Celcius)
		Cooling off site point	93.2° Fahrenheit (34° Celcius)
4	Surfaces	Roof setting	Flat roof: R19 over concrete roof deck
		Exterior wall setting	None: Select one depends on the material properties as gbXML modelling

Gambar 4 memperlihatkan langkah tahapan analisis energi listrik yang dibutuhkan. Hasil dari perhitungan energi listrik yang dibutuhkan ini kemudian dikalikan dengan indeks koefisien emisi CO₂ untuk sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (Jamali) sebesar 0,87 untuk mendapatkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari kegiatan operasional Gedung (Kementerian ESDM, 2021).



Gambar 4. Tahapan Analisis Energi Listrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

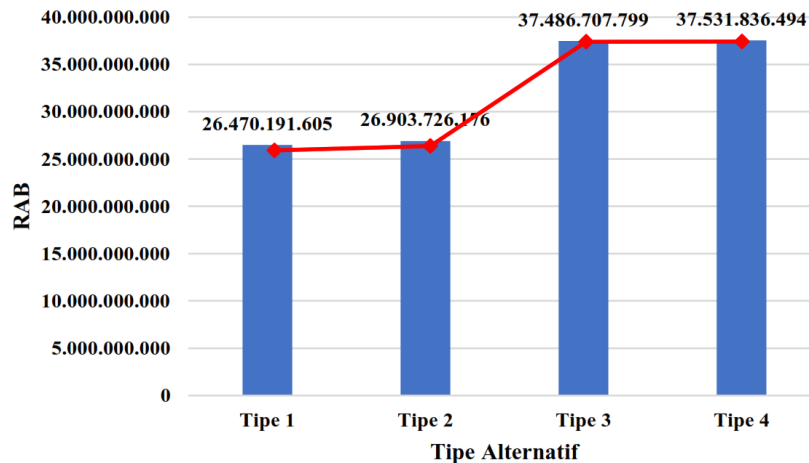
Hasil perhitungan RAB dengan 4 tipe kombinasi material (tabel 4) memperlihatkan bahwa alternatif tipe 1 adalah yang terendah (Rp. 26.470.191.605) dan alternatif tipe 4 adalah yang tertinggi (Rp. 37.531.836.494). Sementara itu, hasil perhitungan emisi CO₂ dengan menggunakan *plugin Tally Revit* dapat dilihat pada tabel 5 dan gambar 5.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Alternatif	RAB Struktur	RAB Arsitektur	Total RAB
Tipe 1	23.794.663.059	2.675.528.546	26.470.191.605
Tipe 2	23.794.663.059	3.109.063.118	26.903.726.176
Tipe 3	34.425.787.949	3.060.919.850	37.486.707.799
Tipe 4	34.422.773.376	3.109.063.118	37.531.836.494

Tabel 5. Hasil Perhitungan Emisi CO₂ Dengan Integrasi BIM

Alternatif	Total Emisi (Kg.CO ₂ eq.)
Tipe 1	1.844.193,76
Tipe 2	1.854.362,10
Tipe 3	2.403.555,16
Tipe 4	2.437.087,69



Gambar 5. Grafik Hasil Analisis Dengan Integrasi BIM

Perhitungan emisi CO₂ secara manual menggunakan indeks koefisien emisi yang didapat dari kegiatan transportasi, proses pengolahan material, dan tenaga kerja. Tabel 6 memperlihatkan daftar indeks emisi CO₂ dari material yang digunakan di proyek ini.

Tabel 6. Daftar Indeks Emisi CO₂

No.	Material	Indeks Emisi (Kg.CO ₂ eq)
1	Batu Belah	0,056
2	Batu Split	0,017

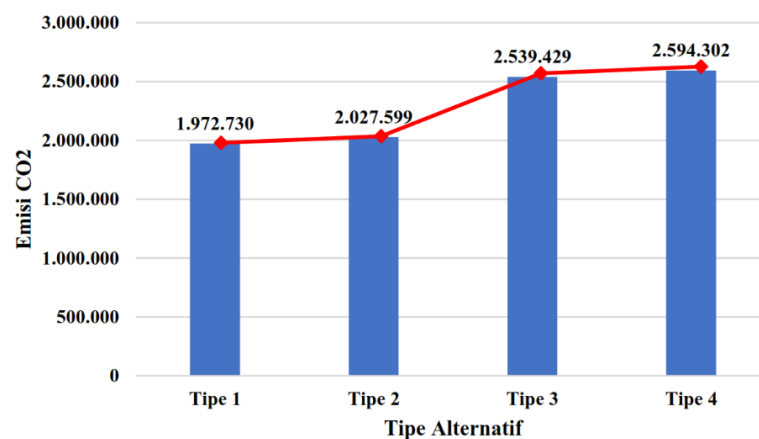
3	Pasir	0,005
4	Semen Portland	0,83
5	Semen Mortar	0,83
6	Besi	1,71
7	Baja	1,71
8	Kayu	0,45
9	Keramik Tile	0,59
10	Bata Merah	0,22
11	Bata Ringan	0,18
12	Cat	1,06
13	Bondex	3,31
14	Kaca	0,85
15	Plywood	0,81

Sumber: Hammond GP dan Jones C.I (2008a, 2008b)

Perhitungan emisi CO₂ diperoleh dengan mengalikan indeks emisi CO₂ dengan kuantitas material yang digunakan dan hasilnya ditunjukkan pada tabel 7 dan gambar 6.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Emisi CO₂ Dengan Metode Manual

Alternatif	Total Emisi (Kg.CO ₂ eq.)
Tipe 1	1.972.730
Tipe 2	2.027.599
Tipe 3	2.539.429
Tipe 4	2.594.302

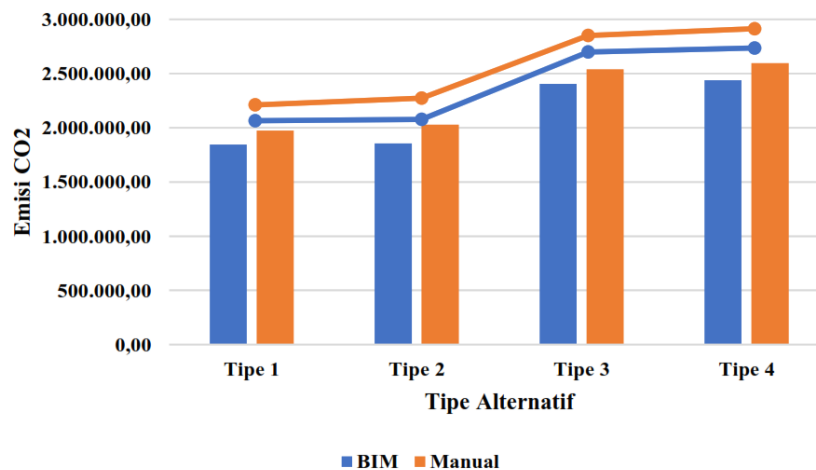


Gambar 6. Grafik Hasil Perhitungan Emisi CO₂ Dengan Metode Manual

Hasil analisis LCA dengan metode BIM dan manual kemudian dibandingkan dan kedua metode tersebut memiliki selisih di setiap alternatif tipe material yang ditunjukkan pada tabel 8 dan gambar 7.

Tabel 8. Perbandingan Perhitungan Emisi CO₂ Antara Metode BIM dan Metode Manual

Alternatif	Emisi	Emisi	Selisih (%)
	Kg.CO ₂ eq (BIM)	Kg.CO ₂ eq (Manual)	
Tipe 1	1.844.193,76	1.972.730	7%
Tipe 2	1.854.362,10	2.027.599	9%
Tipe 3	2.403.555,16	2.539.429	5%
Tipe 4	2.437.087,69	2.594.302	6%



Gambar 7. Grafik Perbandingan Perhitungan Emisi CO₂ Antara Metode BIM dan Metode Manual

Dari perbandingan diatas, didapatkan selisih antara metode BIM dengan metode manual adalah 5% - 9% saja. Hal ini dapat diterima karena masih dibawah 10% sesuai yang disyaratkan ISO 19650.

Analisis GBS menghasilkan data yang berisi penggunaan energi tahunan pada tahap operasional gedung dan hasil analisis emisi CO₂ dari operasional tersebut dapat dilihat pada tabel 9 dan tabel 10.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Biaya Listrik Pada Tahap Operasional Gedung

Alternatif	Listrik kWh	Biaya/ Tahun (Rp.)	Biaya/ Bulan (Rp.)
Tipe 1	477.822	731.067.507	60.922.292
Tipe 2	477.822	731.067.507	60.922.292
Tipe 3	477.822	731.067.507	60.922.292
Tipe 4	477.822	731.067.507	60.922.292

Tabel 10. Hasil Perhitungan Emisi CO₂ Pada Tahap Operasional Gedung

Alternatif	Emisi CO ₂ (KgCO ₂ eq)
Tipe 1	415.705,14
Tipe 2	415.705,14
Tipe 3	415.705,14
Tipe 4	415.705,14



Dari tabel diatas, dapat dilihat bahwa hasil perhitungan emisi CO₂ dari keempat alternatif kombinasi material ternyata memiliki nilai emisi yang sama. Hal ini karena penggunaan material konstruksiyang sejenis, yaitu beton bertulang dengan beton precast dan bata merah dengan bata ringan. Sehingga material-material konstruksi tersebut tidak mempengaruhi hasil secara signifikan.terhadap penggunaan energi listrik.

KESIMPULAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah pertama, nilai rencana anggaran biaya (RAB) terendah ada pada alternatif kombinasi tipe 1 (beton *cast in place*, *façade* bata merah, interior bata ringan) dengan nilai Rp. 260.470.191.605. Kedua, nilai emisi CO₂ yang terendah pada tahap konstruksi adalah tipe 1 (beton *cast in place*, *façade* bata merah, interior bata ringan) dengan nilai 1.844.193,76 KgCO₂eq. Ketiga, nilai emisi CO₂ pada tahap operasional adalah sama untuk keempat alternatif kombinasi tipe material, yaitu 415.705.,14 KgCO₂eq. Keempat, rekomendasi alternatif yang diajukan yaitu alternatif kombinasi tipe 1 karena memiliki emisi CO₂ terendah dengan biaya pembangunan yang terendah juga.

Saran yang dapat diberikan antara lain adalah perlu dilakukan penelitian dengan *inventory* yang berbeda pada saat tahap *Life Cycle Analysis* (LCA).

DAFTAR PUSTAKA

- Bribian, I.Z., Capilla, A.V., and Uson, A.A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46, 1133 – 1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Ervianto, W.I. (2015). Inplementasi green construction sebagai upaya mencapai pembangunan berkelanjutan di Indonesia, Makalah Konferensi Nasional Forum Wahana Teknik ke-2.
- Hammond, G.P., and Jones, C.I. (2008a). Inventory Carbon & Energy (ICE) version 1.6a. Sustainable Energi Research Team (SERT). Departement Mechanical Engineering, Universty of Bath, UK. www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/
- Hammond, G.P., and Jones, C.I. (2008b). Embodied energi and carbon in construction materials, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Energy*, 161, 87–98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- Hermawan, Marzuki, P.F., dan Driejana, M.A.R. (2013). Peran Life Cycle Analysis (LCA) pada Material Konstruksi dalam Upaya Menurunkan Dampak Emisi Karbondioksida pada Efek Gas Rumah Kaca. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 7*, 24-26 Oktober 2013.
- Indonesia (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 16 Tahun 2021 Tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 Tentang Bangunan Gedung.
- ISO (1997a). ISO:14040:2006 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization.
- ISO (1997b). ISO:14044:2006 - Environmental Management - Life Cycle Assessment – Requirement and Guidelines. International Organization for Standardization.
- ISO (2018). ISO-1:2018 - Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) Seri 1-2-3.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2021). Keputusan Menteri ESDM Nomor 163.K/HK.02MEM.S/2021 Tentang Penetapan Faktor Emisi Gas Rumah Kaca Sistem Ketenagalistrikan.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2018). Peraturan Menteri PUPR Nomor 22/PRT/M/2018 Tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2022). Peraturan Menteri PUPR Nomor 1 Tahun 2022 Tentang Pedoman Penyusunan Baya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

KoNTekS17

Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-17

- Lu, K., dan Wang, H. Y. (2019). Estimation of Building's Life Cycle Carbon Emissions Based on Life Cycle Assessment and Building Information Modelling: A Case Study of a Hospital Building in China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7, 147-165. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.76013>
- Mousa, M., Luo, X.W., dan McCabe, B. (2016). Utilizing BIM and Carbon Estimating Methods for Meaningful Data Representation. *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction. Procedia Engineering*, 145, 1242-1249. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.160>
- Munawir, R. (2021). Melawan dampak perubahan iklim dengan penerapan teknologi Building Information Modeling (BIM). Karya tulis, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jendral Bina Konstruksi. <https://binakonstruksi.pu.go.id/publikasi/karya-tulis/melawan-dampak-perubahan-iklim-dengan-penerapan-teknologi-building-information-modelling-bim/>. Diakses tanggal 24 Juli 2023.
- Pemerintah Indonesia (2017). Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi.
- United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies. Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>.
- Zabalza I. Aranda, A., and Scarpellini, S. (2009). Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification. *Building and Environment*, 44, 2510-2520.