



## Evaluasi Efisiensi *Embodied Carbon* dari Spesifikasi Material Bangunan Hijau

Aris Dwi Wicaksono<sup>a\*</sup>, Ridho Bayuaji<sup>b</sup>

<sup>a\*</sup> Program Studi Magister Manajemen Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

<sup>b</sup> Fakultas Vokasi, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

### INFORMASI ARTIKEL

#### Riwayat artikel:

Diterima : 12 April 2025

Diterbitkan : 24 Juni 2025

#### Kata kunci:

Efisiensi *embodied carbon*

Material bangunan hijau

Verifikasi desain

EDGE App

Keinsinyuran berkelanjutan

### ABSTRAK

*Embodied carbon*, yaitu emisi karbon yang tertanam dalam proses produksi dan konstruksi material bangunan, menjadi perhatian utama dalam pembangunan rendah karbon. Sektor bangunan menyumbang 39% dari total emisi gas rumah kaca global, dengan 11% berasal dari material dan aktivitas konstruksi. Studi ini bertujuan untuk memverifikasi efisiensi *embodied carbon* dari spesifikasi material aktual yang digunakan dalam bangunan administrasi sektor energi, yang sejak awal dirancang dengan prinsip keberlanjutan. Penelitian ini mendukung arah kebijakan *Net Zero Emission 2060* dan Permen PUPR No. 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau.

Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus keinsinyuran dengan metode deskriptif-kuantitatif. Data dikumpulkan melalui dokumentasi teknis proyek, observasi lapangan, dan simulasi berbasis sistem *Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE) App*. Elemen bangunan yang dianalisis meliputi dinding, lantai, atap, dan finishing, yang seluruhnya telah menggunakan material efisien sejak awal konstruksi, seperti bata ringan AAC, keramik daur ulang, panel atap insulated, dan cat berbasis air rendah VOC. Tidak terdapat perubahan desain atau penggantian material selama proyek berlangsung.

Hasil simulasi EDGE menunjukkan bahwa bangunan ini mencapai efisiensi material sebesar 83%, jauh di atas ambang batas minimal 20%. Temuan ini membuktikan bahwa strategi pemilihan material yang tepat sejak tahap desain awal mampu secara signifikan menurunkan jejak karbon bangunan. Studi ini mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), penguatan indikator *Environmental, Social, and Governance (ESG)*, serta menjadi bukti penerapan praktik keinsinyuran profesional yang berorientasi pada keberlanjutan dan pengambilan keputusan berbasis data.

### 1. Pendahuluan

*Embodied carbon*, atau emisi karbon yang tertanam dalam proses produksi, distribusi, dan konstruksi material bangunan, telah menjadi salah satu fokus utama dalam agenda global dekarbonisasi sektor konstruksi. Laporan *Global Alliance for Buildings and Construction (Environment Programme, 2022)* menyatakan bahwa sektor bangunan menyumbang sekitar 39% dari total emisi karbon global, dengan 11% berasal dari tahapan non-operasional seperti pemilihan dan penggunaan material. Ini menegaskan bahwa upaya pengurangan emisi tidak hanya dapat dicapai melalui efisiensi energi saat bangunan beroperasi, tetapi juga sejak tahap desain melalui strategi pemilihan material yang berkelanjutan.

Sebagai respons terhadap isu tersebut, berbagai negara termasuk Indonesia telah merumuskan arah kebijakan pembangunan rendah karbon, salah satunya tertuang dalam

Strategi Nasional *Net Zero Emission 2060* (Kementerian PPN/Bappenas, 2025) dan (Peraturan Menteri PUPR No. 21, 2021) tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. Kebijakan ini mendorong praktik konstruksi yang tidak hanya fungsional dan hemat energi, tetapi juga berorientasi pada penggunaan material ramah lingkungan. Salah satu alat bantu pengukuran efisiensi yang diakui secara global adalah sistem *Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE)* yang dikembangkan oleh *International Finance Corporation (IFC)*, yang menggunakan baseline nasional masing-masing negara sebagai tolok ukur efisiensi.

Penelitian ini dilakukan pada sebuah bangunan eksisting sektor energi di Indonesia yang sejak awal dirancang dan dibangun menggunakan prinsip keberlanjutan, baik dari sisi pemanfaatan ruang, pengelolaan energi, maupun pemilihan material. Material yang digunakan meliputi bata ringan AAC untuk dinding, panel metal sandwich insulated untuk atap,

keramik daur ulang untuk lantai, serta cat *low-VOC* berbasis air untuk finishing seluruhnya telah menjadi bagian dari desain awal bangunan dan dipertahankan secara konsisten hingga saat ini. Tidak terdapat proses substitusi material atau perubahan desain selama proyek berjalan.

Dengan menggunakan pendekatan berbasis data dan *life cycle thinking*, studi ini bertujuan untuk memverifikasi dan mengkuantifikasi tingkat efisiensi *embodied carbon* dari spesifikasi material aktual yang digunakan dalam proyek. Penilaian dilakukan melalui simulasi menggunakan *EDGE App* dan dibandingkan terhadap *baseline* nasional Indonesia. Melalui pendekatan ini, proyek tidak hanya menunjukkan kesesuaian dengan prinsip bangunan hijau, tetapi juga memberikan bukti ilmiah bahwa keputusan desain awal yang berbasis keberlanjutan dapat memberikan dampak signifikan terhadap pengurangan emisi.

Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap literatur praktik keinsinyuran yang bertanggung jawab, sekaligus mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* ((United Nations, 2015), terutama pada aspek konsumsi berkelanjutan (SDG 12) dan aksi iklim (SDG 13), serta mendukung penguatan kinerja *Environmental, Social, and Governance* (ESG) perusahaan (Guo, 2025; Lee & Liang, 2024). Pendekatan verifikasi berbasis sistem ini sekaligus menunjukkan bagaimana insinyur profesional berperan aktif dalam pengambilan keputusan teknis yang berdampak strategis bagi keberlanjutan sektor konstruksi nasional.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus keinsinyuran dengan model penelitian deskriptif-kuantitatif, yang bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi *embodied carbon* berdasarkan spesifikasi aktual material bangunan. Penelitian dilakukan pada satu objek studi berupa bangunan eksisting sektor energi yang telah dirancang dan dibangun dengan prinsip keberlanjutan sejak awal perencanaan.

Lokasi penelitian berada di wilayah operasional sebuah perusahaan energi di Jawa Timur, dengan bangunan yang difokuskan adalah gedung administrasi yang digunakan sebagai kantor pusat operasional. Kegiatan pengumpulan data dilakukan selama periode Maret hingga November 2024, bersamaan dengan proses audit kinerja bangunan hijau untuk tujuan sertifikasi *EDGE*.

Teknik pengambilan sampel dilakukan secara *purposive*, yaitu dengan memilih elemen-elemen bangunan yang berkontribusi signifikan terhadap total penggunaan material dan potensi emisi *embodied carbon*. Elemen yang dianalisis mencakup :

- Dinding yang menggunakan bata ringan tipe *Autoclaved Aerated Concrete* (AAC),
- Lantai yang menggunakan keramik berbasis material daur ulang,
- Atap yang menggunakan panel logam sandwich berinsulasi (*metal sandwich insulated panel*),
- Finishing yang menggunakan cat berbasis air dengan kadar senyawa organik mudah menguap rendah (*low-VOC*).

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

1. Data primer, berupa dokumentasi teknis proyek pembangunan, spesifikasi material yang digunakan, serta hasil verifikasi lapangan terhadap elemen-elemen bangunan yang menjadi objek studi,

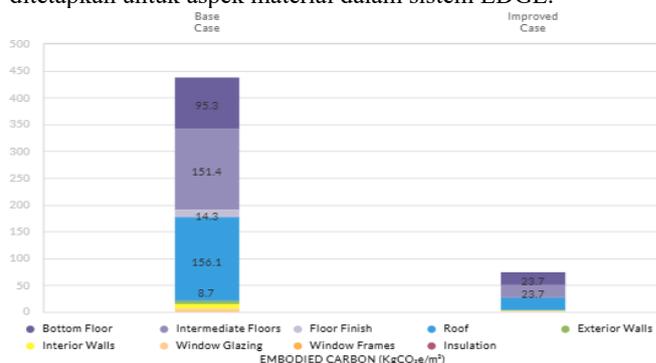
2. Data sekunder, yang meliputi informasi baseline nasional untuk material bangunan dari sistem *EDGE App*, katalog teknis material dari vendor, serta referensi regulasi terkait bangunan gedung hijau.

Instrumen yang digunakan adalah perangkat simulasi berbasis *EDGE App* dari IFC, yang memungkinkan pengukuran efisiensi *embodied carbon* berdasarkan perbandingan material aktual terhadap *baseline* nasional Indonesia. Data dikumpulkan melalui dokumentasi proyek, wawancara dengan tim teknis, serta review laporan perencanaan dan pelaksanaan pembangunan.

Teknik analisis yang digunakan adalah analisis kuantitatif-komparatif, yaitu dengan menghitung nilai efisiensi *embodied carbon* masing-masing elemen bangunan dan total bangunan secara keseluruhan berdasarkan output *EDGE App*. Hasil ini kemudian dievaluasi terhadap standar efisiensi minimal untuk aspek material ( $\geq 20\%$ ) sebagaimana ditetapkan dalam sistem *EDGE*, untuk menilai apakah desain awal bangunan telah memenuhi prinsip keberlanjutan dan efisiensi karbon secara kuantitatif.

## 3. Hasil dan pembahasan

Hasil verifikasi terhadap spesifikasi desain awal bangunan gedung administrasi menunjukkan bahwa bangunan ini telah mengadopsi prinsip efisiensi *embodied carbon* sejak awal tahap perencanaan dan konstruksi. Berdasarkan simulasi menggunakan sistem *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (*EDGE App*), bangunan ini memperoleh capaian efisiensi material sebesar 83%, jauh melampaui ambang batas minimum 20% yang ditetapkan untuk aspek material dalam sistem *EDGE*.



**Gambar 1.** Perbandingan Nilai *Embodied Carbon* (KgCO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>) antara *Base Case* dan *Improved Case*

Gambar 1. menunjukkan penurunan signifikan pada total *embodied carbon* bangunan per meter persegi dari kondisi baseline nasional (*Base Case*) ke desain aktual proyek (*Improved Case*). Reduksi terlihat paling dominan pada elemen *intermediate floors*, *roof*, dan *bottom floor*, yang merupakan komponen dengan kontribusi tertinggi pada baseline. Ini mencerminkan bahwa pemilihan material efisien sejak awal konstruksi secara langsung berdampak terhadap pengurangan emisi *embodied carbon* secara akumulatif.

Efisiensi ini bukan diperoleh dari proses retrofit atau substitusi material, melainkan dari keputusan desain awal yang telah mengintegrasikan penggunaan material bangunan dengan efisiensi tinggi terhadap jejak karbon. Verifikasi dilakukan dengan menginput spesifikasi aktual bangunan ke dalam sistem *EDGE App* dan membandingkannya terhadap baseline nasional Indonesia.

Elemen-elemen bangunan yang dianalisis meliputi:

- Dinding menggunakan bata ringan tipe *Autoclaved Aerated Concrete* (AAC) yang memiliki bobot ringan dan proses produksi lebih hemat energi.

- Lantai menggunakan keramik berbasis material daur ulang dengan kandungan >50% bahan bekas pakai.
- Atap menggunakan panel logam sandwich berinsulasi yang ringan dan memiliki performa termal tinggi.
- Finishing menggunakan cat berbasis air dengan kadar *volatile organic compounds* (VOC) rendah yang mendukung kualitas udara dalam ruang.

Rincian spesifikasi dan karakteristik efisiensi dari masing-masing elemen disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.**

Spesifikasi Material Bangunan dan Kontribusinya terhadap Efisiensi *Embodied Carbon*

Elemen Bangunan	Jenis Material Aktual	Karakteristik Efisiensi	Kontribusi Terhadap Efisiensi <i>Embodied Carbon</i>
Dinding	Bata ringan AAC	Ringan, rendah energi produksi, insulasi termal baik	Tinggi
Lantai	Keramik berbasis daur ulang	Kandungan > 50% material daur ulang, proses manufaktur efisien	Tinggi
Atap	Panel logam sandwich berinsulasi	Isolasi termal tinggi, ringan, pemasangan cepat	Sedang-tinggi
Finishing	Cat berbasis air ( <i>low-VOC</i> )	Emisi VOC rendah, ramah lingkungan, sesuai standar kesehatan dalam ruang	Sedang

Salah satu dokumentasi visual terhadap implementasi material-material tersebut di lapangan diperlihatkan pada Gambar 2



**Gambar 2.** Dokumentasi Visual Implementasi Material Efisien, Cat Berbasis Air *Low-VOC*

Secara teoritis, capaian ini sejalan dengan prinsip *life cycle assessment* (LCA), di mana pengurangan emisi dilakukan sejak tahap hulu (produksi dan pemilihan material). (Zhao et al., 2024) menekankan bahwa efisiensi *embodied carbon* yang tinggi dapat dicapai jika keputusan pemilihan material dilakukan secara strategis sejak desain awal. (Lai et al., 2023) juga menunjukkan bahwa tren bangunan hijau di Asia Tenggara telah bergeser dari fokus energi operasional menuju pengurangan karbon awal melalui pemanfaatan material efisien dan praktik *reuse*.

Pendekatan seperti ini sesuai dengan konsep *early-stage carbon intervention* sebagaimana disampaikan oleh (Sun,

2024), yang menyatakan bahwa strategi pemilihan material sejak awal fase perencanaan memiliki dampak paling besar dalam mengendalikan total emisi. Dalam konteks proyek ini, hasil simulasi dan data teknis membuktikan bahwa efisiensi bukan hasil dari intervensi pasca-konstruksi, melainkan berasal dari ketepatan keputusan keinsinyuran yang berbasis data dan pertimbangan keberlanjutan sejak awal.

Secara kebijakan, capaian ini mendukung arah strategis nasional sebagaimana tertuang dalam Permen PUPR No. 21 Tahun 2021 dan peta jalan *Net Zero Emission 2060* yang mendorong adopsi material rendah karbon dan efisiensi sumber daya. Kontribusi proyek ini juga relevan dalam mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG 12 dan SDG 13) (United Nations, 2015) serta memperkuat indikator *Environmental, Social, and Governance* (ESG) pada aspek lingkungan dan tanggung jawab sosial perusahaan.

Dengan efisiensi sebesar 83% berdasarkan analisis sistem EDGE, proyek ini menunjukkan bahwa desain teknis bangunan berbasis data dan prinsip keberlanjutan tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang terukur. Pendekatan ini mencerminkan praktik keinsinyuran profesional yang berpijak pada integritas data, transparansi metodologi, dan relevansi terhadap tantangan global dalam pembangunan berkelanjutan.

#### 4. Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bangunan administrasi yang dianalisis telah menerapkan prinsip efisiensi *embodied carbon* secara optimal sejak tahap desain awal. Melalui verifikasi berbasis sistem EDGE App terhadap spesifikasi material aktual, diperoleh efisiensi material sebesar 83%, jauh melampaui ambang batas minimum 20% yang ditetapkan untuk kategori bangunan hijau. Efisiensi ini tidak dihasilkan melalui penggantian atau retrofitting, melainkan dari keputusan teknis insinyur dalam memilih material seperti bata ringan AAC, keramik daur ulang, panel atap insulated, dan cat *low-VOC* yang terbukti memiliki karakteristik ramah lingkungan dan berdampak rendah terhadap emisi karbon.

Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan *life cycle thinking* dan *early-stage carbon intervention* dalam praktik keinsinyuran bangunan berkelanjutan. Strategi desain yang tepat sejak awal terbukti tidak hanya berdampak pada penurunan jejak karbon bangunan, tetapi juga mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) serta meningkatkan performa *Environmental, Social, and Governance* (ESG) perusahaan.

Dengan demikian, studi ini menegaskan bahwa praktik keinsinyuran berbasis data, regulasi, dan teknologi seperti EDGE dapat berkontribusi nyata terhadap dekarbonisasi sektor konstruksi dan penguatan tanggung jawab lingkungan profesional insinyur di Indonesia.

#### Daftar pustaka

- EDGE App. (2024). Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE). International Finance Corporation (IFC). Diakses dari <https://app.edgebuildings.com/>
- Environment Programme, U. (2022). *Global Status Report For Buildings and Construction*. www.globalabc.org.

- Guo, W. (2025). Navigating dual pressures: The impact of environmental policies and market demand risks on the sustainable development of green building materials - A case study of the green cement industry. *Heliyon*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41942>
- Kementerian PPN/Bappenas. (2025). *Strategi dan Penahapan Pembangunan Rendah Karbon dalam RPJPN 2025-2045*.
- Lai, F., Zhou, J., Lu, L., Hasanuzzaman, M., & Yuan, Y. (2023). Green building technologies in Southeast Asia: A review. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 55). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102946>
- Lee, C. L., & Liang, J. (2024). The effect of carbon regulation initiatives on corporate ESG performance in real estate sector: International evidence. *Journal of Cleaner Production*, 453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142188>
- Peraturan Menteri PUPR No. 21. (2021). *Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau*.
- Sun, Y. (2024). The impact of green buildings on CO2 emissions: Evidence from commercial and residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143168>
- United Nations. (2015). *Transforming Our World : The 2030 Agenda For Sustainable Development*.
- Zhao, Y., Gao, G., Zhang, J., & Yu, M. (2024). Impact of carbon tax on green building development: An evolutionary game analysis. *Energy Policy*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114401>