JURNAL TEKNIK SIPIL CENDEKIA
e-ISSN : 2723-3375
doi : **10.51988/jtsc.v7i4.712**
pp : 740-751

Perbandingan *Embodied Carbon* antara Metode Konvensional dan *Off-Site Construction* di Indonesia

[*]Najwa Aulia Salsabila[1], Yongki Alexander Tanne[2], Falderika[1]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia, Bandung, Indonesia [2]Program Studi Smart Construction & Civil Engineering, Calvin Institute of Technology, Jakarta, Indonesia
[*)]najwaauliasalsabila14@gmail.com

Received : 5 Agustus 2026 Revised : 14 Oktober 2026 Accepted : 28 Oktober 2026

Abstrak

Off-site construction berkembang sebagai alternatif konstruksi rendah karbon termasuk di Indonesia. Dengan demikian, perlu dilakukan evaluasi mengenai kontribusi sistem off-site construction di Indonesia terhadap embodied carbon. Penelitian ini bertujuan membandingkan embodied carbon metode konvensional, MOBOX, WASKITA + BEP, dan RISHA pada rumah tinggal dua lantai di Bandung, serta mengidentifikasi sumber emisi dominan dan sensitivitas variabel penyusunnya. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment pada batas sistem cradle-to-site (Modul A1–A5). Hasil penelitian menunjukkan bahwa MOBOX menghasilkan embodied carbon terendah sebesar 9.957,52 kgCO_2e, sedangkan RISHA tertinggi sebesar 10.392,37 kgCO_2e. Emisi material menjadi kontributor utama dengan proporsi 82–94% dari total embodied carbon. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa jarak transportasi dan produktivitas alat instalasi lebih berpengaruh dibandingkan waste material. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan off-site construction tidak secara otomatis menghasilkan embodied carbon yang lebih rendah, melainkan dipengaruhi oleh kebutuhan material, sistem struktur, dan rantai pasok proyek.

Kata kunci: *Embodied Carbon, Life Cycle Assessment, Off-site Construction*

© Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil Cendekia 2026. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

PENDAHULUAN

Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) telah menjadi salah satu fokus utama dalam industri konstruksi sebagai respons terhadap meningkatnya tuntutan untuk mengurangi dampak lingkungan akibat aktivitas pembangunan. Seiring dengan pesatnya pertumbuhan urbanisasi dan pembangunan infrastruktur, sektor konstruksi dituntut untuk tidak hanya memenuhi aspek biaya, mutu, dan waktu, tetapi juga mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya serta meminimalkan dampak lingkungan selama siklus hidup bangunan. Oleh karena itu, penerapan prinsip keberlanjutan menjadi semakin penting sebagai dasar dalam mewujudkan industri konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan mendukung pencapaian target pembangunan rendah karbon [1], [2].

Salah satu alasan utama sektor konstruksi menjadi prioritas dalam penerapan prinsip keberlanjutan adalah besarnya kontribusi sektor ini terhadap konsumsi energi dan emisi karbon global. Sektor bangunan dan konstruksi menyumbang sekitar 39% emisi karbon dioksida (CO_2) global serta 36% konsumsi

energi dunia, sehingga menjadikannya sebagai salah satu sektor dengan dampak lingkungan terbesar [3].

Selain emisi yang dihasilkan selama tahap operasional bangunan, perhatian terhadap *embodied carbon* juga semakin meningkat sebagai salah satu komponen utama emisi sepanjang siklus hidup bangunan. *Embodied carbon* merupakan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari seluruh tahapan siklus hidup material dan bangunan, mulai dari ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, transportasi, konstruksi, penggunaan, hingga pembongkaran dan pengelolaan akhir material, bergantung pada batas sistem *Life Cycle Assessment* (LCA) yang digunakan. Dalam pendekatan LCA, tahapan tersebut dikelompokkan ke dalam empat fase utama, yaitu tahap produk (A1–A3), tahap konstruksi (A4–A5), tahap penggunaan (B1–B7), dan tahap akhir siklus hidup/*end-of-life* (C1–C4), serta Modul D yang mencakup potensi manfaat dari penggunaan kembali dan daur ulang material [3], [4].

Berbeda dengan emisi operasional yang dihasilkan selama masa penggunaan bangunan, *embodied carbon* sebagian besar telah dilepaskan sejak tahap awal pembangunan sehingga upaya reduksinya perlu dilakukan melalui pemilihan material, optimalisasi proses konstruksi, serta penerapan metode konstruksi yang lebih efisien dan berkelanjutan [3], [4].

Sejalan dengan upaya pengurangan *embodied carbon*, perkembangan teknologi konstruksi di berbagai negara terus mengarah pada penerapan metode yang lebih efisien dan berkelanjutan. Berbagai teknologi dalam konsep *Construction 4.0*, seperti *Building Information Modeling* (BIM), *Digital Twin*, *Internet of Things* (IoT), *3D Printing*, *Laser Scanner*, serta *off-site construction*, telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, mengurangi limbah konstruksi, dan mendukung pencapaian tujuan keberlanjutan [1].

Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah metode *off-site construction*, yaitu metode konstruksi yang memindahkan proses fabrikasi komponen bangunan dari lokasi proyek ke fasilitas manufaktur sebelum dirakit di lapangan [5]. Metode ini semakin banyak diterapkan karena dinilai mampu mendukung pencapaian *sustainability* melalui peningkatan efisiensi konstruksi, pengurangan limbah material, serta optimalisasi penggunaan sumber daya. Dalam kajian *Construction Automation and Robotics*, metode ini termasuk dalam kategori *prefabrication and modularization*. Berdasarkan tingkat prefabrikasinya, *off-site construction* umumnya diklasifikasikan menjadi *component sub-assembly, panelized system, volumetric modular system*, dan *hybrid system*, yang masing-masing memiliki karakteristik dan tingkat penyelesaian komponen yang berbeda [6], [7].

Di Indonesia, penerapan *off-site construction* juga mulai berkembang sebagai alternatif terhadap metode konstruksi konvensional untuk meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek dan mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan [6], [8]. Perkembangan industri *off-site construction* di Indonesia ditandai dengan semakin beragamnya sistem konstruksi prefabrikasi yang dikembangkan oleh pemerintah maupun industri konstruksi [9]. Di antara berbagai sistem tersebut, terdapat beberapa sistem yang mulai umum diperkenalkan, yaitu MOBOX sebagai sistem *volumetric modular* berbasis rangka baja, sistem *component-based precast* yang menggunakan produk PT Waskita Beton Precast Tbk. dan PT Beton Elemenindo Perkasa (BEP) serta RISHA [10], [11], [12], [13]. Ketiga metode tersebut dipilih karena mewakili tingkat prefabrikasi dan karakteristik sistem yang berbeda, sehingga memungkinkan dilakukan evaluasi dan perbandingan *embodied carbon* pada berbagai pendekatan *off-site construction* [5].

Meskipun berbagai penelitian menunjukkan bahwa *off-site construction* berpotensi mengurangi *embodied carbon*, penelitian yang membandingkan beberapa sistem *off-site construction* dalam konteks Indonesia masih terbatas [14]. Sebagian besar studi masih berfokus pada perbandingan nilai total *embodied carbon* antara metode konvensional dan satu jenis *off-site construction*, tanpa mengkaji kontribusi masing-masing sumber emisi maupun sensitivitas variabel yang memengaruhinya, seperti transportasi, *waste*

material, dan produktivitas pemasangan [15], [16], [17] serta tingkat prefabrikasi. Selain itu, karakteristik Indonesia sebagai negara kepulauan dengan kondisi logistik dan distribusi material yang beragam menyebabkan hasil penelitian dari negara lain belum tentu dapat diterapkan secara langsung [18], [19]. Oleh karena itu, penelitian ini membandingkan tiga sistem *off-site construction* yaitu MOBOX**,** WASKITA + BEP dan RISHA terhadap metode konvensional serta menganalisis pengaruh variabel-variabel utama terhadap *embodied carbon* melalui analisis sensitivitas.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: membandingkan nilai *embodied carbon* antara metode konstruksi konvensional dan sistem *off-site construction* yang telah tersedia di Indonesia; melakukan identifikasi variabel yang berkontribusi dominan terhadap nilai *embodied carbon* pada masing-masing metode konstruksi; serta melakukan analisis sensitivitas terhadap variabel penyusun pada masing-masing metode konstruksi.
Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam memperkaya basis data *embodied carbon* untuk berbagai *sistem off-site construction* di Indonesia, mengidentifikasi sumber-sumber emisi yang paling dominan pada setiap metode konstruksi, serta memberikan pemahaman mengenai tingkat sensitivitas variabel-variabel yang memengaruhi *embodied carbon* sebagai dasar pengembangan strategi konstruksi rendah emisi.

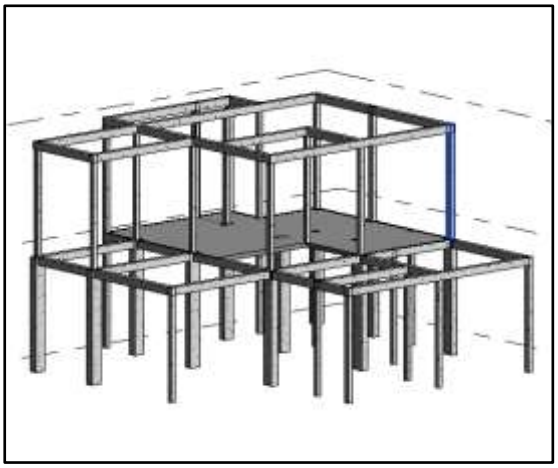
METODE

Penelitian ini bersifat simulatif-komparatif dengan meninjau elemen struktur atas yaitu kolom, balok, dan plat lantai pada rumah tinggal dua lantai yang berlokasi di Kota Bandung sebagai studi kasus. Tipe bangunan ini dipilih karena merepresentasikan hunian tapak yang dominan di Indonesia serta memiliki elemen struktur lengkap, meliputi pondasi, sloof, kolom, balok, dan pelat lantai [20].

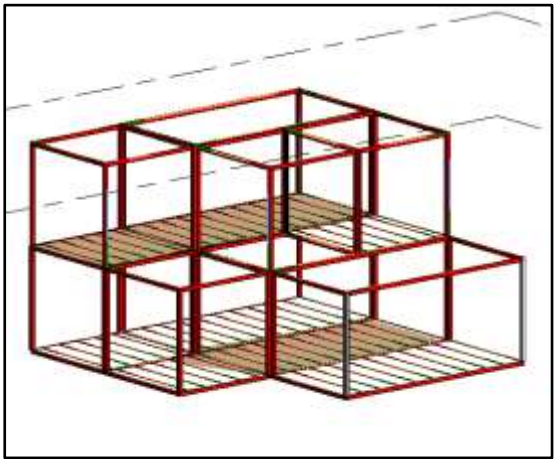
Berdasarkan studi kasus tersebut, desain rumah konvensional dikonversi menjadi empat skenario konstruksi melalui proses *re-design* dan *quantity take-off* menggunakan *Autodesk Revit*, yaitu

- Skenario 1: metode konvensional (*cast-in-situ*),
- Skenario 2: *volumetric modular* MOBOX,
- Skenario 3: *component-based* WASKITA + BEP, dan
- Skenario 4: *component-based* RISHA

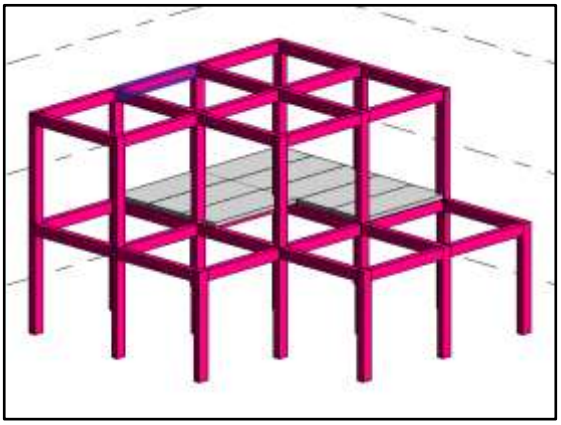
Setiap skenario disesuaikan dengan standar dimensi dan spesifikasi komponen yang tersedia sehingga perbandingan dapat dilakukan pada kondisi yang setara. Visualisasi model tiga dimensi untuk masing-masing skenario ditunjukkan pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



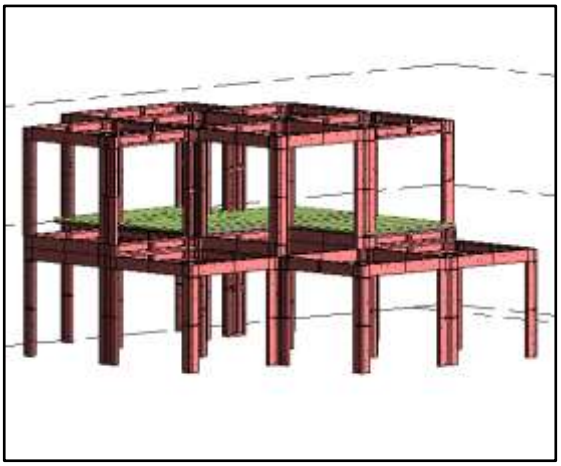
Gambar 1. 3D Pemodelan Skenario Konvensional



Gambar 2. 3D Pemodelan Skenario MOBOX



Gambar 3. 3D Pemodelan Skenario WASKITA + BEP



Gambar 4. 3D Pemodelan Skenario RISHA

Data kuantitas material hasil *quantity take-off* selanjutnya digunakan untuk menghitung *embodied carbon* pada batas sistem *cradle-to-site* (Modul A1–A5) menggunakan faktor emisi dari *Construction Industry Development Board* (CIDB) *Malaysia* 2022 dan *UK Government GHG Conversion Factors* 2026 [21], [22]. Faktor emisi tersebut digunakan karena ketersediaan data faktor emisi konstruksi di Indonesia masih terbatas. Penggunaan kedua database tersebut berpotensi menghasilkan nilai *embodied carbon* yang berbeda dibandingkan dengan penggunaan database lokal Indonesia yang lebih spesifik, mengingat perbedaan proses produksi, teknologi, sumber energi, dan kondisi rantai pasok material di setiap negara. Perhitungan mencakup emisi material, transportasi, penggunaan alat instalasi, dan *waste* material.

Penelitian melakukan perhitungan nilai *embodied carbon* pada beberapa komponen yaitu volume material, *waste*, transportasi, dan emisi alat instalasi. Berikut adalah beberapa rumus untuk menghitung *embodied carbon* volume material dan *waste* material [23]:

$$EM = V \times EC \quad (1)$$

Di mana:
EM = Emisi material
V = Volume material
EC = Koefisien *embodied carbon* spesifik untuk material

Tabel 1. Parameter Analisis Antar Skenario

Sedangkan untuk *embodied carbon* dari transportasi dan alat instalasi di lapangan menggunakan rumus-rumus berikut [24]:

$$ET = M \times S \times EC \quad (2)$$

Di mana:
ET = Emisi transportasi
M = Berat beban kendaraan
S = Jarak pabrik ke lokasi proyek
EC = Koefisien *embodied carbon* spesifik untuk material (bahan bakar kendaraan)

$$EA = T \times EC \quad (3)$$

Di mana:
EA = Emisi alat berat
T = Jam kerja alat berat
EC = Koefisien *embodied carbon* spesifik untuk material (bahan bakar kendaraan)

Parameter yang digunakan dalam perhitungan *embodied carbon*, meliputi produktivitas alat instalasi, konsumsi bahan bakar, serta persentase *waste* material pada masing-masing metode konstruksi, ditentukan berdasarkan hasil penelitian terdahulu dan spesifikasi teknis yang relevan. Ringkasan parameter yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Pada metode konvensional, produktivitas *concrete pump* ditetapkan sebesar 12,44 m^3/jam dengan konsumsi bahan bakar 5,8 liter/jam [25], [26]. Sedangkan persentase *waste* material ditentukan sebesar 5,57% untuk

beton, 4,91% untuk baja tulangan, dan 1,643% untuk bekisting dengan kebutuhan bekisting sebesar 0,4 m³ per 1 m³ pekerjaan beton [27], [28].

Pada metode *volumetric modular* MOBOX, waktu pemasangan setiap modul diasumsikan selama 33,29 menit menggunakan *mobile crane*, dengan persentase *waste* material sebesar 3,04%, mengingat sebagian besar limbah pada sistem modular baja dihasilkan pada tahap fabrikasi sehingga penelitian ini hanya memperhitungkan limbah yang terjadi selama proses perakitan di lokasi proyek [29], [30]

Sementara itu, pada metode *component-based* WASKITA + BEP, proses pemasangan komponen pracetak diasumsikan berlangsung selama 13 menit per komponen menggunakan *mobile crane* dengan konsumsi bahan bakar 15 liter/jam [31], [32]. Sedangkan persentase waste material ditetapkan sebesar 2% karena limbah utama terjadi pada tahap fabrikasi. Asumsi *waste* yang sama juga diterapkan pada metode RISHA [33].

Untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kondisi proyek terhadap *embodied carbon*, dilakukan analisis sensitivitas terhadap tiga variabel utama, yaitu jarak transportasi, persentase *waste* material, dan produktivitas alat instalasi. Analisis sensitivitas jarak dilakukan dengan memvariasikan lokasi *batching plant* dan pabrik pracetak di berbagai wilayah Jawa Barat yang mewakili rentang jarak tertentu menuju lokasi proyek, sedangkan metode MOBOX tidak dianalisis karena hanya memiliki satu fasilitas produksi di Bekasi.

Untuk analisis sensitivitas *waste* material dilakukan melalui simulasi perubahan persentase dari 0% hingga 10% pada seluruh metode konstruksi. Sementara itu, analisis sensitivitas produktivitas dilakukan melalui lima skenario, yaitu produktivitas *baseline*, penurunan sebesar 15% dan 25%, serta peningkatan sebesar 15% dan 25% terhadap nilai *baseline*. Analisis ini hanya diterapkan pada metode konvensional, MOBOX, dan WASKITA + BEP, sedangkan metode RISHA tidak dianalisis karena proses pemasangan komponennya dilakukan secara manual menggunakan tenaga kerja tanpa memerlukan alat berat, sehingga perubahan produktivitas alat instalasi tidak relevan untuk dievaluasi [10].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan *Embodied Carbon* Antar Skenario

Parameter	Konvensional	MOBOX	WASKITA + BEP	RISHA
Alat instalasi	*Concrete pump*	*Mobile crane*	*Mobile crane*	-
Produktivitas	12.44 m³/jam	33.29 menit/modul	13 menit/komponen	-
Konsumsi BBM	5.8 L/jam	15 L/jam	15 L/jam	-
***Waste* material**	5.57%, 4.91%, 1.64%	3.04%	2%	2%

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap metode konstruksi menghasilkan nilai *embodied carbon* yang berbeda meskipun diterapkan pada bangunan dan batas sistem yang sama. Berdasarkan Tabel 2, metode MOBOX menghasilkan emisi terendah sebesar 9.957,52 $kgCO_2e$, diikuti metode konvensional sebesar 10.143,19 $kgCO_2e$, WASKITA + BEP sebesar 10.232,67 $kgCO_2e$, dan RISHA sebesar 10.392,37 $kgCO_2e$. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penerapan *off-site construction* tidak selalu menghasilkan *embodied carbon* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional.

Dibandingkan MOBOX sebagai metode dengan emisi terendah, metode konvensional menghasilkan *embodied carbon* 1,86% lebih tinggi, sedangkan WASKITA + BEP dan RISHA masing-masing lebih tinggi sebesar 2,76% dan 4,37%. Jika metode konvensional dijadikan acuan, MOBOX mampu menurunkan *embodied carbon* sebesar 1,83%, sementara WASKITA + BEP dan RISHA justru meningkat masing-masing sebesar 0,88% dan 2,46%. Meskipun selisih antar metode relatif kecil, hasil ini menunjukkan bahwa besarnya *embodied carbon* tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat prefabrikasi, tetapi

juga oleh kebutuhan material, konfigurasi struktur, dan karakteristik proses konstruksi.

Untuk mengidentifikasi penyebab perbedaan *embodied carbon* pada setiap metode, dilakukan analisis terhadap kontribusi variabel emisi material, transportasi, alat instalasi, dan *waste* material.

Tabel 2. Nilai *Embodied Carbon* Antar Skenario

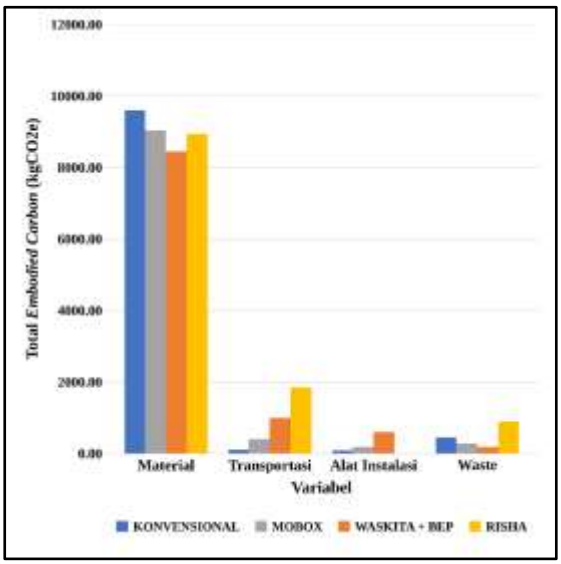
Skenario	Material ($kgCO_2e$)	Transportasi ($kgCO_2e$)	Alat Instalasi ($kgCO_2e$)	*Waste* ($kgCO_2e$)	Total Emisi ($kgCO_2e$)
Konvensional	9554.14	117.52	12.21	459.32	**10143.19**
MOBOX	9071.53	410.86	199.36	275.77	**9957.52**
WASKITA + BEP	8411.4	1038.89	614.15	168.23	**10232.67**
RISHA	8974.80	1361.49	0	179.50	**10392.37**

Hasil penelitian ini berbeda dengan sebagian besar penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa *off-site construction* umumnya menghasilkan *embodied carbon* lebih rendah dibandingkan metode konvensional melalui pengurangan *waste*, peningkatan efisiensi fabrikasi, dan pengendalian mutu di pabrik [15], [16], [17], [19]. Pada penelitian ini, hanya metode MOBOX yang menghasilkan emisi lebih rendah, sedangkan WASKITA + BEP dan RISHA memiliki emisi yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa manfaat lingkungan dari *off-site construction* sangat bergantung pada karakteristik sistem yang digunakan, termasuk kebutuhan material, konfigurasi struktur, lokasi fasilitas produksi, dan jarak distribusi, sehingga hasil penelitian dari negara lain tidak dapat diterapkan secara langsung pada konteks Indonesia.

Secara keseluruhan, MOBOX merupakan metode dengan *embodied carbon* terendah, sedangkan RISHA menghasilkan emisi tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat prefabrikasi bukan satu-satunya faktor yang menentukan besarnya *embodied carbon*, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi kebutuhan material, transportasi yang berkaitan dengan rantai pasok, alat instalasi yang berkaitan dengan metode konstruksi, serta *waste* proses produksi. Oleh karena itu, evaluasi *embodied carbon* perlu mempertimbangkan kontribusi setiap sumber emisi pada seluruh batas sistem *cradle-to-site*.

***Breakdown Embodied Carbon* Antar Skenario**

memiliki pola yang serupa, yaitu emisi material mendominasi total *embodied carbon* dengan kontribusi sekitar 82–94%, sedangkan transportasi, alat instalasi, dan waste memberikan kontribusi yang jauh lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kebutuhan material merupakan faktor utama yang menentukan besarnya *embodied carbon* pada setiap metode konstruksi.



Gambar 5. Perbandingan Kontribusi Emisi Berdasarkan Variabel Emisi Antar Metode

Variabel emisi material merupakan penyumbang terbesar pada seluruh metode konstruksi. Metode konvensional menghasilkan emisi material tertinggi sebesar 9.554,14 $kgCO_2e$, sedangkan WASKITA + BEP menghasilkan yang terendah sebesar 8.411,40 $kgCO_2e$. Sementara itu, MOBOX dan RISHA menghasilkan emisi material yang relatif serupa, masing-masing sebesar 9.071,53

$kgCO_2e$ dan 8.974,80 $kgCO_2e$. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan dan jenis material yang digunakan lebih berpengaruh terhadap *embodied carbon* dibandingkan metode konstruksinya.

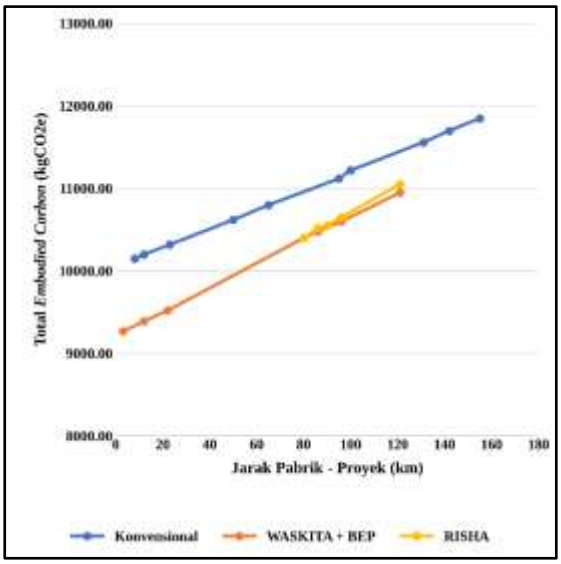
Kontribusi variabel emisi transportasi bervariasi cukup signifikan antar metode. RISHA menghasilkan emisi transportasi tertinggi (1.361,49 $kgCO_2e$), diikuti WASKITA + BEP (1.038,89 $kgCO_2e$), MOBOX (410,86 $kgCO_2e$), dan konvensional (117,52 $kgCO_2e$). Tingginya emisi pada sistem *off-site construction* dipengaruhi oleh kebutuhan pengiriman komponen pracetak dari fasilitas produksi ke lokasi proyek, sedangkan metode konvensional memanfaatkan material yang umumnya dipasok dari lokasi yang lebih dekat.

Emisi alat instalasi merupakan variabel dengan kontribusi terkecil terhadap *embodied carbon* dibanding komponen lainnya. WASKITA + BEP menghasilkan emisi tertinggi sebesar 614,15 $kgCO_2e$ akibat penggunaan *mobile crane* untuk pemasangan setiap komponen pracetak. MOBOX menghasilkan emisi lebih rendah (199,36 $kgCO_2e$) karena jumlah proses pengangkatan modul lebih sedikit, sedangkan metode konvensional hanya menghasilkan 12,21 $kgCO_2e$ dari penggunaan *concrete pump* dan *ready-mix*. Pada metode RISHA tidak terdapat emisi alat instalasi karena proses pemasangan dilakukan tanpa alat berat.

Emisi akibat *waste* material relatif kecil dibandingkan variabel lainnya. Metode konvensional menghasilkan emisi *waste* tertinggi sebesar 459,32 $kgCO_2e$, sejalan dengan persentase *waste* yang digunakan sebesar 5,57% untuk beton, 4,91% untuk baja tulangan, dan 1,64% untuk bekisting. Sebaliknya, metode WASKITA + BEP dan RISHA yang menggunakan asumsi *waste* sebesar 2% menghasilkan emisi masing-masing sebesar 168,23 $kgCO_2e$ dan 179,50 $kgCO_2e$, sedangkan MOBOX dengan persentase waste 3,04% menghasilkan emisi sebesar 275,77 $kgCO_2e$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem *off-site construction* cenderung menghasilkan limbah konstruksi yang lebih rendah karena sebagian besar proses fabrikasi dilakukan di pabrik, meskipun kontribusi emisi *waste* terhadap total *embodied carbon* masih relatif kecil dibandingkan emisi material.

Analisis Sensitivitas

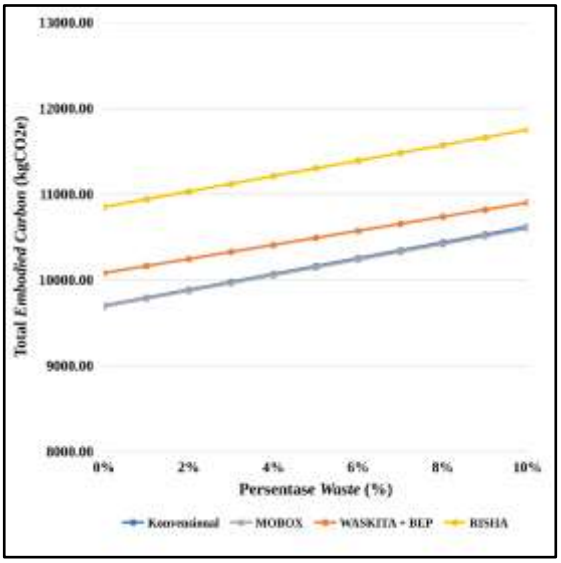
Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kondisi proyek terhadap nilai *embodied carbon* pada setiap metode konstruksi. Tiga variabel yang dianalisis meliputi jarak transportasi, produktivitas alat instalasi, dan persentase waste material. Analisis ini bertujuan mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap perubahan *embodied carbon* sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi reduksi emisi yang lebih efektif.



Gambar 6. Hubungan Jarak terhadap *Embodied Carbon* Antar Metode

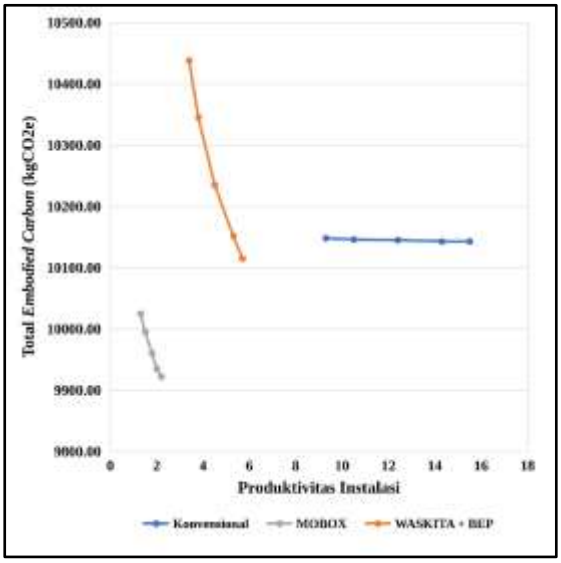
Analisis sensitivitas transportasi dilakukan dengan memvariasikan jarak antara fasilitas produksi dan lokasi proyek. Untuk metode MOBOX tidak dianalisis karena hanya memiliki satu fasilitas produksi di Bekasi. Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin jauh jarak transportasi, semakin besar nilai *embodied carbon* pada seluruh metode konstruksi yang dianalisis. Peningkatan paling signifikan terjadi pada RISHA dan WASKITA + BEP, sedangkan metode konvensional menunjukkan kenaikan yang lebih landai. Hal ini menunjukkan bahwa metode *off-site construction*, khususnya yang menggunakan komponen pracetak, lebih sensitif terhadap perubahan jarak transportasi karena

bergantung pada distribusi komponen dari pabrik ke lokasi proyek.



Gambar 7. Hubungan *Waste* terhadap *Embodied Carbon* Antar Metode

Analisis sensitivitas *waste* dilakukan dengan memvariasikan persentase limbah dari 0% hingga 10%. Gambar 7 menunjukkan bahwa peningkatan waste menyebabkan kenaikan *embodied carbon* yang hampir linier pada seluruh metode konstruksi. Meskipun demikian, besarnya kenaikan relatif kecil dan pola perubahan antar metode hampir serupa. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan persentase *waste* memberikan pengaruh terhadap *embodied carbon*, namun tingkat sensitivitasnya masih lebih rendah dibandingkan pengaruh produktivitas alat instalasi maupun transportasi.



Gambar 8. Hubungan Produktivitas Instalasi terhadap *Embodied Carbon* Antar Metode

Analisis produktivitas dilakukan melalui lima skenario, yaitu penurunan sebesar 25% dan 15%, kondisi *baseline*, serta peningkatan sebesar 15% dan 25%. Berdasarkan Gambar 8, peningkatan produktivitas menurunkan *embodied carbon* pada metode MOBOX dan WASKITA + BEP, sedangkan metode konvensional hampir tidak mengalami perubahan. Penurunan paling besar terjadi pada WASKITA + BEP karena penggunaan mobile crane memberikan kontribusi emisi alat instalasi yang relatif tinggi. Sebaliknya, pengaruh pada MOBOX lebih kecil, sementara metode konvensional cenderung tidak sensitif akibat emisi alat instalasinya yang sangat rendah.

Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa jarak transportasi merupakan variabel yang paling sensitif terhadap perubahan *embodied carbon*. Variabel *waste* material juga memengaruhi total emisi, namun dengan tingkat sensitivitas yang lebih rendah. Sementara itu, perubahan produktivitas alat instalasi hanya memberikan pengaruh yang relatif kecil karena kontribusi emisi alat terhadap total *embodied carbon* juga rendah.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode MOBOX menghasilkan *embodied carbon*

terendah, sedangkan RISHA menghasilkan nilai tertinggi pada studi kasus yang dianalisis. Analisis *breakdown* memperlihatkan bahwa emisi material mendominasi total *embodied carbon* dengan kontribusi sekitar 82–94%, sementara transportasi, alat instalasi, dan *waste* memberikan kontribusi yang relatif kecil. Meskipun demikian, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa jarak transportasi merupakan variabel yang paling sensitif terhadap perubahan *embodied carbon*, diikuti oleh *waste* material, sedangkan produktivitas alat instalasi hanya memberikan pengaruh yang relatif kecil.

Secara khusus, metode RISHA menunjukkan bahwa meskipun emisi alat instalasinya bernilai nol dalam perhitungan penelitian ini, emisi transportasinya merupakan yang tertinggi dibandingkan metode lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik komponen pracetak RISHA dan kebutuhan distribusinya dapat menjadi faktor yang meningkatkan emisi transportasi, sehingga tidak digunakannya alat berat untuk instalasi tidak serta-merta menghasilkan *embodied carbon* yang lebih rendah.

Hasil tersebut menunjukkan kecenderungan yang berbeda dengan sebagian besar penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa *off-site construction* mampu menurunkan *embodied carbon* melalui pengurangan *waste*, peningkatan efisiensi fabrikasi, dan pengendalian kualitas di pabrik [15], [16], [19]. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya dilakukan pada negara yang telah memiliki rantai pasok *off-site construction* yang lebih matang dengan fasilitas produksi yang terintegrasi. Sebaliknya, pada penelitian ini, perbedaan sistem struktur, kebutuhan material, serta lokasi fasilitas produksi menghasilkan nilai *embodied carbon* yang tidak selalu lebih rendah dibandingkan metode konstruksi konvensional.

Temuan tersebut memberikan implikasi penting bagi penerapan *off-site construction* di Indonesia. Pemilihan metode konstruksi rendah karbon tidak dapat didasarkan hanya pada tingkat prefabrikasi, tetapi juga perlu mempertimbangkan kebutuhan material, lokasi fasilitas produksi, serta sistem logistik proyek. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi *embodied carbon* sebaiknya dilakukan secara spesifik sesuai karakteristik proyek agar metode yang dipilih benar-benar memberikan manfaat lingkungan.

Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, strategi pengurangan *embodied carbon* sebaiknya diprioritaskan pada optimalisasi rantai pasok melalui pemilihan lokasi fasilitas produksi dan efisiensi distribusi material karena memberikan pengaruh yang paling besar terhadap total emisi. Selain itu, pengurangan *waste* material tetap perlu dilakukan meskipun dampaknya relatif moderat. Sebaliknya, peningkatan produktivitas alat instalasi tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap total *embodied carbon*, sehingga manfaatnya lebih berpotensi dirasakan pada aspek biaya dan waktu pelaksanaan proyek.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, nilai *embodied carbon* yang dihasilkan oleh setiap metode konstruksi menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Metode MOBOX menghasilkan *embodied carbon* terendah sebesar 9.957,52 $kgCO_2e$, diikuti oleh metode konvensional sebesar 10.143,19 $kgCO_2e$, component-based WASKITA + BEP sebesar 10.232,67 $kgCO_2e$, dan RISHA sebesar 10.392,37 $kgCO_2e$. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan *off-site construction* tidak selalu menghasilkan *embodied carbon* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional, tetapi dipengaruhi oleh karakteristik sistem konstruksi yang digunakan.

Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh kontribusi masing-masing sumber emisi terhadap total *embodied carbon*. Hasil analisis menunjukkan bahwa emisi material merupakan komponen yang paling dominan dengan kontribusi sekitar 84–94%, sedangkan emisi transportasi, penggunaan alat instalasi, dan waste material memberikan kontribusi yang relatif lebih kecil. Dengan demikian, pengurangan kebutuhan material menjadi faktor utama yang berpotensi menurunkan *embodied carbon* pada berbagai metode konstruksi.

Selain dipengaruhi oleh besarnya kontribusi masing-masing komponen, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa setiap variabel memiliki tingkat pengaruh yang berbeda terhadap perubahan *embodied carbon*. Variabel produktivitas alat instalasi merupakan faktor yang paling sensitif pada metode yang menggunakan alat berat, khususnya *component-based* WASKITA + BEP dan MOBOX, sedangkan pengaruh jarak transportasi dan persentase *waste* material relatif lebih kecil terhadap perubahan total *embodied carbon*. Temuan ini menunjukkan bahwa upaya pengurangan *embodied carbon* pada *off-site construction* perlu mempertimbangkan karakteristik masing-masing sistem konstruksi melalui optimalisasi penggunaan material, peningkatan efisiensi proses instalasi, dan pengelolaan rantai pasok yang sesuai dengan kondisi proyek.

Penelitian ini masih terbatas pada perhitungan *embodied carbon* di tahap *cradle-to-site* (Modul A1–A5) dan tiga variabel sensitivitas (jarak transportasi, *waste* material, serta produktivitas alat instalasi). Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas cakupan hingga seluruh siklus hidup bangunan (*cradle-to-cradle*), meneliti pengaruh variabel lain seperti jenis material, bauran material rendah karbon, dan sumber energi fabrikasi, serta mengkaji lebih banyak sistem *off-site construction* dan tipe bangunan. Dengan begitu, akan tersedia basis data *embodied carbon* yang lebih lengkap dan strategi penerapan *off-site construction* yang lebih efektif di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Y. A. Tanne, "Evaluating Digital Twin and Construction 4.0 Technologies for Sustainable Construction," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science PAPER*, 2026, pp. 0–14. doi: 10.1088/1755-1315/1649/1/012010.

[2] L. Chen *et al.*, *Green construction for low - carbon cities : a review*, vol. 21, no. 3. Springer International Publishing, 2023. doi: 10.1007/s10311-022-01544-4.

[3] World Green Building Council, "Bringing embodied carbon upfront," *World Green Build. Counc.*, 2019.

[4] F. Pomponi and A. Moncaster, "Scrutinising embodied carbon in buildings : The next performance gap made manifest," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. February 2017, pp. 2431–2442, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.049.

[5] M. Kamali and K. Hewage, "Life cycle performance of modular buildings : A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1171–1183, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.031.

[6] Y. A. Tanne and N. L. A. Indrayani, "Review of Construction Automation and Robotics Practices in Indonesian Construction State - Owned Enterprises : Position in Project Life Cycle , Gap to Best Practice and Potential Uses," *Archit. Struct. Constr.*, vol. 3, no. 3, pp. 373–389, 2023, doi: 10.1007/s44150-023-00098-5.

[7] B. Ginigaddara, S. Perera, Y. Feng, and P. Rahnamayiezekavat, "Development of an Offsite Construction Typology : A Delphi Study," *Buildings*, 2022.

[8] Y. Guo, E. Shi, R. Yan, and W. Wei, "System based greenhouse emission analysis of off - site prefabrication : a comparative study of residential projects," *Sci. Rep.*, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37782-x.

[9] V. Viriezky, D. Susanto, and M. F. Alkadri, "Flexible and Sustainable Incremental Houses : Advancing Semi-Volumetric Systems of Prefabricated Construction for Rapid Urbanization in Indonesia," *infrastructures*, 2025.

[10] K. P. Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, "Rumah Instan Sederhana Sehat (RISHA)." [Online]. Available: https://pu.go.id/pustaka/biblio/risha-rumah-instan-sederhana-sehat/LG26GJ

[11] PT Waskita Beton Precast Tbk, "PT Waskita Beton Precast Tbk (WSBP)." [Online]. Available: https://waskitaprecast.co.id

[12] PT Adhi Karya (Persero) Tbk., "Teknologi MOBOX (Modular Volumetrik Mobile Box)." [Online]. Available: https://adhi.co.id

[13] PT Beton Elemenindo Perkasa, "About Us — PT. Beton Elemenindo Perkasa."

[Online]. Available: https://beton.co.id/en/about

[14] A. Yan, W. Agung, and Syafrudin, "Carbon Emission Analysis of Modular Construction (Case Study : Mobox 3x6)," in *ICENIS 2025*, 2025.

[15] H. Pervez, Y. Ali, and A. Petrillo, "A quantitative assessment of greenhouse gas (GHG) emissions from conventional and modular construction : A case of developing country," *J. Clean. Prod.*, vol. 294, p. 126210, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126210.

[16] B. P. Y. Loo, X. Li, and R. W. M. Wong, "Environmental comparative case studies on modular integrated construction and cast-in-situ construction methods," *J. Clean. Prod.*, vol. 428, no. September, p. 139303, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139303.

[17] H. Jang, Y. Ahn, and S. Roh, "Comparison of the Embodied Carbon Emissions and Direct Construction Costs for Modular and Conventional Residential Buildings in South Korea," *Buildings*, 2022.

[18] M. Keintjem, R. Suwondo, and L. Cunningham, "Embodied Carbon in Concrete : Insights from Indonesia and Comparative Analysis with UK and USA," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 6, pp. 17737–17742, 2024.

[19] J. Jayawardana, M. Sandanayake, J. A. S. C. Jayasinghe, A. K. Kulatunga, and G. Zhang, "A comparative life cycle assessment of prefabricated and traditional construction – A case of a developing country," *J. Build. Eng.*, vol. 72, no. April, 2023.

[20] A. Utama and S. H. Gheewala, "Indonesian residential high rise buildings : A life cycle energy assessment," *Energy Build.*, vol. 41, pp. 1263–1268, 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.025.

[21] C. Malaysia, "EMBODIED CARBON INVENTORY DATA FOR CONSTRUCTION MATERIALS," 2022.

[22] UK Government, "UK Government GHG Conversion Factors 2026," 2026.

[23] K. Marisa, P. Wardhana, D. K. Sudarsana, A. Agung, and D. Parami, "Comparative Analysis of Carbon Emissions Between Precast Concrete and Cast-In-Place Methods," *Am. J. Open Res.*, vol. 4, no. 10, pp. 336–348, 2025.

[24] Y. Huang and A. Wang, "Research on Carbon Emission of Prefabricated Structure in China," *MDPI*, 2023.

[25] M. M. H. Abdullah, R. S. Nugroho, and A. Magfirona, "ANALISIS PRODUKTIVITAS PENGECORAN DITINJAU DARI ASPEK BIAYA DAN WAKTU MENGGUNAKAN TOWER CRANE DAN CONCRETE PUMP," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2024*, 2024, pp. 271–278.

[26] MACPEX, "Trailer type concrete pump by diesel."

[27] A. H. A. Munawar, T. I. K. Amar, R. Rizana, and S. Maghfuri, "ANALISIS WASTE MATERIAL PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG DISHUB KABUPATEN KARANGANYAR," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2025*, 2025, pp. 67–75.

[28] A. F. Septianugraha and S. Winarno, "Estimasi Indeks Waste Material Konstruksi untuk Proyek Bangunan di Indonesia," *Agreg. J. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 2, 2021.

[29] L. Loizou, K. Barati, X. Shen, and B. Li, "Quantifying Advantages of Modular Construction : Waste Generation," *MDPI*, pp. 1–21, 2021.

[30] A. Nikeghbali, "Estimation of Mobile Crane Cycle Time to Improve the Accuracy of Modular-Based Heavy Construction Project Schedules," 2021.

[31] I. I. Susanti and D. S. Hadi, "Comparative Analysis Methods Fullslab Precast Erection of Cost and Time," *JWC J. World Conf.*, vol. 2, no. 2, pp. 81–91, 2020.

[32] Terex, "Fuel Consumption Site at 15 – Hino Engine," 2008.

[33] N. A. Suhaini, N. H. Abas, and S. Nagapan, "Identification of Construction Waste Generated at Precast Concrete Plants : Case study Identification of Construction Waste Generated at Precast Concrete Plants :

Case study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. Pap.*, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/601/1/012036.