

Emisi Gas Rumah Kaca Industri Konstruksi di Indonesia: Sumber dan Strategi Mitigasi

Baiq Dini Luqyana Khailila, Arafat Barata Syah*, Khairunnisa Kusumawijaya, Mohammad Palwa Priya Rajendra, Alfina Trihapsari, Najwa Kamila Syarifah, Anie Yulistyorini*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Negeri Malang, Indonesia

*Koresponden email: arafat.barata.2405276@students.um.ac.id, anie.yulistyorini.ft@um.ac.id

Diterima: 12 Mei 2026

Disetujui: 26 Mei 2026

Abstract

The construction sector is one of the significant contributors to global greenhouse gas emissions and carbon footprint, mainly through construction material production, energy consumption during construction activities, and material transportation. Rapid infrastructure development in Indonesia has further increased the contribution of this sector to carbon emissions. This study aims to review the main sources of greenhouse gas emissions and carbon footprint in the construction sector and to identify mitigation strategies reported in scientific literature. This study employed a systematic literature review method by analyzing 50 scientific articles published between 2015 and 2025, obtained from ScienceDirect, Google Scholar, MDPI, ResearchGate, OpenAlex, as well as several Scopus- and SINTA-indexed journals using the keywords “greenhouse gas emissions”, “carbon footprint”, “construction industry”, and “construction”. The results indicate that major emission sources originate from high-carbon-intensity materials such as cement and steel, fossil-fuel-based construction equipment, and transportation of construction materials. Mitigation strategies commonly proposed in the literature include green building implementation, the use of low-carbon materials, development of low-carbon cement, and the application of circular construction to improve resource efficiency and reduce carbon emissions.

Keywords: *carbon footprint, construction, construction industry, greenhouse gas emissions, strategy mitigation*

Abstrak

Sektor konstruksi merupakan salah satu kontributor penting terhadap emisi gas rumah kaca dan jejak karbon global, terutama melalui produksi material konstruksi, penggunaan energi selama proses pembangunan, serta aktivitas transportasi material. Peningkatan pembangunan infrastruktur di Indonesia turut meningkatkan kontribusi sektor ini terhadap emisi karbon. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji sumber utama emisi gas rumah kaca dan *carbon footprint* pada sektor konstruksi serta mengidentifikasi berbagai strategi mitigasi yang dilaporkan dalam literatur ilmiah. Metode yang digunakan adalah *systematic literature review* dengan menganalisis 50 artikel ilmiah yang dipublikasikan pada periode 2015–2025 dan diperoleh dari database ScienceDirect, Google Scholar, MDPI, ResearchGate, OpenAlex, serta beberapa jurnal terindeks Scopus dan SINTA menggunakan kata kunci “greenhouse gas emissions”, “carbon footprint”, “construction industry”, dan “construction”. Hasil kajian menunjukkan bahwa sumber utama emisi berasal dari produksi material berintensitas karbon tinggi seperti semen dan baja, penggunaan alat berat berbahan bakar fosil, serta transportasi material konstruksi. Strategi mitigasi yang banyak direkomendasikan meliputi penerapan konsep *green building*, penggunaan material rendah karbon, pengembangan semen rendah karbon, serta penerapan konstruksi sirkular untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan menurunkan emisi karbon.

Kata Kunci: *emisi gas rumah kaca, industri konstruksi, jejak karbon, konstruksi, strategi mitigasi*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim global yang ditandai dengan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK), khususnya karbon dioksida (CO₂), menempatkan sektor konstruksi sebagai salah satu sektor strategis dalam agenda mitigasi emisi. Di Indonesia, percepatan pembangunan infrastruktur dalam beberapa tahun terakhir telah mendorong peningkatan aktivitas konstruksi secara signifikan, yang secara simultan berkontribusi terhadap peningkatan emisi CO₂ nasional [1]. Keterkaitan antara pertumbuhan sektor konstruksi dan peningkatan emisi menunjukkan adanya tantangan struktural dalam menyeimbangkan pembangunan fisik dengan prinsip keberlanjutan.

Emisi GRK dalam industri konstruksi tidak hanya bersumber dari tahap operasional bangunan, tetapi

juga secara signifikan berasal dari tahap konstruksi dan produksi material. Analisis konsumsi energi dan emisi pada tahap pelaksanaan proyek jalan di Indonesia menunjukkan bahwa penggunaan alat berat, proses produksi material seperti semen dan aspal, serta aktivitas transportasi memberikan kontribusi besar terhadap total emisi proyek [2]. Temuan ini menegaskan bahwa fase konstruksi (*construction phase*) memiliki peran penting dalam siklus emisi, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan total jejak karbon sektor konstruksi.

Pada skala elemen struktur, identifikasi jejak karbon pada pekerjaan cast in situ pile dalam proyek stadion multifungsi menunjukkan bahwa material beton dan baja tulangan menjadi penyumbang dominan emisi karbon, terutama yang berasal dari proses produksi material [3]. Hal tersebut memperlihatkan bahwa karbon yang terkandung (*embodied carbon*) pada material konstruksi merupakan komponen krusial dalam total emisi, sehingga strategi mitigasi tidak dapat hanya difokuskan pada efisiensi energi operasional bangunan.

Secara makro, peningkatan emisi dari industri konstruksi juga memiliki implikasi terhadap dimensi pembangunan manusia. Hubungan antara emisi CO₂ sektor konstruksi dan indikator pembangunan nasional menunjukkan bahwa pola pertumbuhan yang bertumpu pada ekspansi fisik berpotensi meningkatkan tekanan lingkungan apabila tidak disertai strategi dekarbonisasi yang terintegrasi [1]. Dengan demikian, transformasi menuju konstruksi rendah karbon menjadi bagian integral dari agenda pembangunan berkelanjutan nasional.

Upaya dekarbonisasi infrastruktur di Indonesia menghadapi berbagai peluang dan tantangan, termasuk aspek regulasi, kesiapan teknologi, serta koordinasi antar pemangku kepentingan [4]. Transformasi tersebut menuntut integrasi kebijakan, inovasi teknologi konstruksi, serta perubahan paradigma dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek. Salah satu instrumen kebijakan yang dinilai berpotensi mendorong perubahan perilaku industri adalah penerapan carbon tax pada sektor konstruksi, yang dapat menginternalisasi biaya eksternal emisi dan mendorong efisiensi penggunaan energi serta material [5].

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji emisi GRK pada level proyek, elemen struktur, maupun kebijakan makro, kajian yang secara sistematis mensintesis temuan-temuan tersebut dalam satu kerangka analisis terpadu masih terbatas. Studi yang ada cenderung berdiri secara parsial, baik berfokus pada kuantifikasi teknis emisi [2], pada implikasi pembangunan dan tren emisi [1], maupun pada dimensi kebijakan dan tata kelola dekarbonisasi [4].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel review ini bertujuan untuk menyusun sintesis komprehensif mengenai sumber, karakteristik, serta strategi mitigasi emisi gas rumah kaca dari industri konstruksi di Indonesia. Kajian ini mengintegrasikan perspektif teknis kuantifikasi emisi, implikasi pembangunan, serta instrumen kebijakan dekarbonisasi, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi konseptual dalam perumusan strategi konstruksi rendah karbon yang lebih terarah dan berbasis bukti ilmiah.

2. Metode Review Literatur Database

Artikel ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian terkait emisi gas rumah kaca dalam industri konstruksi di Indonesia pada periode 2015-2025. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan proses seleksi literatur yang transparan, terstruktur, dan dapat direplikasi.

Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah utama, yaitu:

- 1) ScienceDirect
- 2) ResearchGate
- 3) MDPI (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*)
- 4) Google Scholar
- 5) Open Alex

Pemilihan database tersebut didasarkan pada cakupan publikasi internasional dan nasional yang relevan dengan bidang teknik lingkungan, teknik sipil, dan studi keberlanjutan konstruksi.

Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian meliputi kombinasi: "*greenhouse gas emissions*" "*construction industry*" "*carbon footprint*" "*construction*". Rentang tahun publikasi dibatasi antara 2015 hingga 2025 untuk memastikan keterbaruan dan relevansi temuan penelitian terhadap kondisi industri konstruksi terkini.

Kriteria Seleksi

Tahapan seleksi literatur dilakukan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari proses identifikasi

awal, penyaringan judul dan abstrak, penilaian kelayakan berdasarkan teks penuh, hingga penetapan artikel yang masuk dalam analisis akhir. Alur ini mengacu pada pedoman pelaporan tinjauan sistematis yang telah banyak digunakan dalam penelitian ilmiah. Artikel yang dimasukkan dalam kajian ini harus memenuhi beberapa kriteria berikut:

- 1) Merupakan artikel ilmiah yang telah melalui proses *peer-review*.
- 2) Membahas secara spesifik emisi gas rumah kaca pada sektor konstruksi, baik pada level industri maupun material penyusunnya.
- 3) Menggunakan pendekatan kuantitatif, seperti *Life Cycle Assessment* (LCA), inventarisasi emisi, analisis faktor emisi, atau pemodelan sistem.
- 4) Dipublikasikan dalam rentang tahun 2015-2025 agar sesuai dengan perkembangan isu dan kebijakan terbaru.
- 5) Memiliki keterkaitan langsung dengan konteks Indonesia, atau setidaknya relevan untuk dianalisis dalam kerangka industri konstruksi nasional.

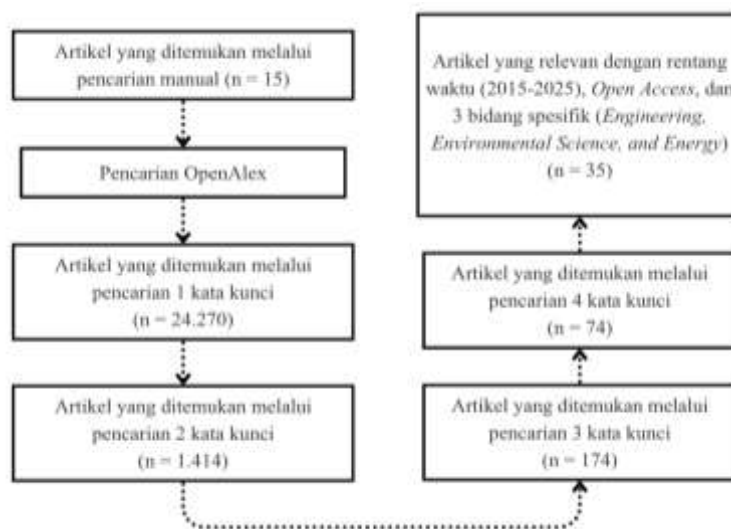
Sementara itu, artikel dikeluarkan dari kajian apabila:

- 1) Tidak tersedia dalam bentuk teks lengkap (*full text*).
- 2) Tidak membahas secara langsung emisi pada sektor konstruksi.
- 3) Termasuk dalam kategori non-ilmiah, seperti opini, artikel populer, atau laporan tanpa metodologi yang jelas dan terukur.

Seluruh literatur yang memenuhi kriteria tersebut kemudian dianalisis secara kualitatif dengan menitikberatkan pada identifikasi sumber emisi utama, karakteristik embodied carbon pada material konstruksi, serta berbagai strategi mitigasi yang diusulkan dalam masing-masing studi.

Flow Diagram Seleksi Literatur

Pada **Gambar 1** menunjukkan diagram alir proses seleksi literatur yang digunakan dalam penyusunan artikel review mengenai emisi gas rumah kaca pada industri konstruksi. Diagram alir tersebut menggambarkan tahapan sistematis dalam memilih dan menyaring sumber literatur agar referensi yang digunakan relevan, valid, dan sesuai dengan topik penelitian.



Gambar 1. Diagram alir proses seleksi literatur dalam penyusunan artikel review

3. Hasil dan Pembahasan

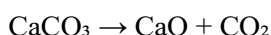
Emisi pada Produksi Semen

Produksi semen merupakan salah satu penyebab utama emisi gas rumah kaca dalam industri konstruksi karena proses pembentukan klinker menghasilkan emisi karbon dioksida dari reaksi kimia dan penggunaan energi termal yang sangat besar.



Gambar 2. Kontribusi emisi CO₂ terbesar

Gambar 2 menunjukkan diagram alir proses produksi semen beserta tahapan yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Berdasarkan diagram tersebut, tahap *kiln* merupakan proses yang paling dominan dalam menghasilkan emisi CO₂, terutama melalui reaksi kalsinasi batu kapur dan pembakaran bahan bakar fosil untuk mencapai suhu tinggi.



Reaksi kalsinasi tersebut menghasilkan emisi CO₂ secara langsung dari proses kimia dekomposisi batu kapur menjadi kapur tohor (*quicklime*). Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil pada proses pembakaran juga meningkatkan jumlah emisi karbon yang dihasilkan selama produksi semen berlangsung. Kedua proses tersebut menjadi sumber utama emisi dalam industri semen, sejalan dengan temuan bahwa konsumsi energi dan emisi terbesar pada produksi semen berasal dari proses kalsinasi dan penggunaan bahan bakar fosil [2].

Dalam pendekatan *life cycle assessment* (LCA), tahap produksi klinker menjadi sumber emisi terbesar dalam seluruh siklus hidup semen Portland, baik pada pendekatan *mid-point* maupun *end-point* assessment. Analisis LCA juga menunjukkan bahwa penggunaan energi termal/panas dan listrik selama produksi berkontribusi besar terhadap total emisi karbon, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan optimasi proses menjadi faktor kunci dalam mengurangi dampak lingkungan, khususnya melalui inovasi material dan proses produksi semen rendah karbon [6].

Dalam konteks Indonesia, pengukuran emisi gas rumah kaca oleh perusahaan semen menunjukkan bahwa sumber emisi bukan hanya berasal dari pembakaran bahan bakar dan proses kalsinasi, tetapi juga dari konsumsi listrik dan aktivitas pendukung lainnya dalam sistem produksi [7]. Studi ini menggunakan pemodelan dinamika sistem untuk mensimulasikan skenario transisi menuju kondisi karbon netral. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi efisiensi energi, substitusi bahan bakar, dan inovasi teknologi produksi dapat secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dari sektor industri semen [7]. Temuan tersebut menunjukkan bahwa semen merupakan material dengan karakteristik *embodied carbon* tinggi dan menjadi sumber dominan emisi dalam struktur beton akibat tingginya intensitas karbon pada material berbasis semen [8].

Produksi Baja

Produksi baja merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca (GRK) dalam industri konstruksi, khususnya pada tahap *embodied carbon* material struktural. Emisi GRK dari baja bersumber dari proses produksi primer (*ironmaking* dan *steelmaking*), konsumsi energi berbasis bahan bakar fosil, serta proses akhir seperti fabrikasi dan transportasi. Dalam penilaian daur hidup/LCA, emisi tersebut termasuk dalam tahap produksi material yang menjadi bagian utama dalam *embodied carbon* bangunan yang dipengaruhi oleh pemilihan material dan tahap produksi [9].

Berdasarkan analisis LCA, emisi gas rumah kaca yang dihasilkan pada produksi baja paling banyak bersumber pada proses awal, yaitu proses produksi primer yang mencakup *ironmaking* dan *steelmaking*. Hal ini terjadi karena pada proses tersebut dibutuhkan energi yang sangat besar, terutama yang berasal dari

bahan bakar fosil, seperti batubara, serta adanya reaksi reduksi bijih besi yang secara langsung menghasilkan karbon dioksida (CO_2). Jika dibandingkan dengan proses lain, seperti pada proses fabrikasi dan transportasi, proses produksi primer memiliki intensitas emisi yang lebih tinggi karena dominasi proses energi-intensif dalam produksi material struktural [10].

Dalam data yang diperoleh dari penelitian [11], menunjukkan bahwa faktor emisi baja relatif tinggi dibandingkan material lainnya. Koefisien emisi baja tercatat sebesar $1,860 \text{ tCO}_2/\text{t}$ atau sekitar $1,86 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$. Terlebih pada sistem beton bertulang memiliki faktor emisi sebesar $2,67 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$, jauh lebih tinggi dari beton biasa yang faktor emisinya hanya sebesar $0,121 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$.

Pada kasus bangunan komersial dengan tingkat rendah, total emisi struktur baja tercatat sebesar $196,49 \text{ tCO}_2$ untuk fase konstruksi dan pembongkaran. Sementara pada sistem beton bertulang, baja tulangan menyumbang $75,22\%$ dari total emisi struktur, yaitu sebesar $217,16 \text{ tCO}_2$ dari total $288,71 \text{ tCO}_2$. Perihal ini menjelaskan bahwa baja merupakan kontributor utama *embodied carbon* pada sistem struktur konvensional yang umum digunakan di Indonesia [11].

Industri semen dan baja merupakan dua sektor material konstruksi yang memiliki kontribusi besar terhadap emisi karbon global karena tingginya kebutuhan energi termal dan penggunaan bahan bakar fosil selama proses produksi [12]. Pada industri baja, proses reduksi bijih besi dalam tanur tinggi (*blast furnace*) menghasilkan emisi CO_2 dalam jumlah besar akibat penggunaan kokas sebagai agen pereduksi sekaligus sumber energi utama. Hal ini menyebabkan baja primer memiliki intensitas karbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan material hasil daur ulang.

Crawford juga menjelaskan bahwa sebagian besar *embodied carbon* pada bangunan berasal dari material struktural seperti baja dan beton, terutama pada tahap produksi awal sebelum material digunakan di lokasi proyek [13]. Emisi dari produksi baja umumnya lebih dominan dibandingkan tahap fabrikasi dan transportasi karena proses manufakturnya memerlukan suhu sangat tinggi dan konsumsi energi secara terus-menerus. Oleh karena itu, strategi pengurangan emisi pada material baja perlu difokuskan pada efisiensi proses produksi dan pemilihan material rendah karbon [14].

Penelitian Chabi *et al.* juga menunjukkan bahwa pemilihan material struktural sangat memengaruhi nilai emisi karbon bangunan secara keseluruhan [15]. Penggunaan baja dengan kandungan daur ulang yang lebih tinggi dapat menurunkan emisi karbon secara signifikan dibandingkan penggunaan baja primer secara penuh. Dengan demikian, pengendalian emisi pada produksi baja menjadi langkah penting dalam upaya menekan *embodied carbon* sektor konstruksi secara keseluruhan [16].

Menurut penelitian Chew *et al.* *Embodied Carbon* baja memiliki karakteristik tersendiri dibandingkan material konstruksi lainnya karena sebagian besar emisinya terjadi pada proses awal [11]. Proses produksi baja yang membutuhkan temperatur tinggi dan konsumsi energi besar menyebabkan intensitas emisi yang dihasilkan per satuan massa relatif tinggi. Secara umum, karakteristik *embodied carbon* meliputi:

- 1) Intensitas emisi tinggi per satuan massa
- 2) Dominasi pada struktur beton bertulang
- 3) Dipengaruhi oleh keputusan desain

Energi Alat Berat

Penggunaan alat berat pada tahap pelaksanaan konstruksi merupakan salah satu sumber utama emisi gas rumah kaca (GRK) di sektor konstruksi. Kontribusi ini terutama muncul pada fase pembangunan proyek, ketika berbagai peralatan seperti *excavator*, *bulldozer*, *motor grader*, *asphalt finisher*, dan *dump truck* beroperasi menggunakan bahan bakar fosil, khususnya solar. Proses pembakaran bahan bakar tersebut menghasilkan emisi CO_2 yang signifikan. Dalam kerangka *life cycle assessment* (LCA), emisi dari aktivitas ini dikategorikan sebagai emisi langsung (*direct emissions*) pada tahap A5 (*construction/installation process*), berbeda dengan *embodied carbon* material yang umumnya berasal dari tahap produksi (A1-A3) [17].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa alat berat menjadi salah satu penyumbang emisi dominan selama tahap konstruksi, terutama pada proyek infrastruktur dengan intensitas pekerjaan tinggi seperti pembangunan jalan dan pekerjaan tanah. Studi oleh Mulyana & Wirahadikusumah serta Lendra *et al.* menunjukkan bahwa konsumsi energi alat berat memiliki kontribusi besar terhadap total emisi proyek yang dipengaruhi oleh jenis alat, kapasitas, durasi operasi, serta efisiensi penggunaan bahan bakar [2], [18]. Hal ini menegaskan bahwa fase konstruksi memiliki peran signifikan dalam membentuk jejak karbon proyek, meskipun seringkali perhatian lebih difokuskan pada emisi dari material konstruksi.

Dalam pendekatan LCA, emisi dari alat berat bersifat operasional dan temporer, namun pada proyek berskala besar kontribusinya dapat menjadi sangat signifikan [19]. Selain itu, emisi ini tidak terakumulasi

dalam produk akhir bangunan, melainkan terjadi selama proses konstruksi berlangsung. Oleh karena itu, besarnya emisi sangat dipengaruhi oleh intensitas aktivitas konstruksi serta efektivitas pengelolaan proyek [2], [20], [21]. Secara umum, emisi dari penggunaan energi alat berat memiliki beberapa ciri utama, yaitu:

- 1) Termasuk dalam kategori emisi langsung yang terjadi di lokasi proyek akibat penggunaan bahan bakar pada alat berat [17]
- 2) Dipengaruhi oleh aspek teknis seperti efisiensi mesin, jenis bahan bakar, teknologi pembakaran, dan pola operasional alat [17]
- 3) Bersifat fluktuatif, tergantung pada lamanya waktu dan tingkat aktivitas konstruksi [2]
- 4) Berpotensi ditekan melalui strategi efisiensi dan integrasi teknologi rendah karbon dalam sektor konstruksi [22]

Dari perspektif manajemen proyek, pengendalian operasional menjadi faktor kunci dalam menentukan besarnya emisi. Tingginya durasi *idle time* (mesin menyala tanpa aktivitas produktif) dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar secara tidak efisien dan berdampak langsung pada peningkatan emisi [20]. Oleh karena itu, penerapan prinsip *lean construction*, optimasi penjadwalan kerja, serta peningkatan efisiensi operasional alat berat menjadi strategi penting dalam menekan emisi pada tahap konstruksi.

Sejalan dengan upaya dekarbonisasi sektor konstruksi sebagai bagian dari system pengurangan emisi yang lebih luas dalam sektor lingkungan [23], pengurangan emisi dari alat berat dapat dilakukan melalui modernisasi peralatan dengan efisiensi energi yang lebih tinggi, penggunaan bahan bakar alternatif, serta pengembangan alat berat berbasis listrik atau sistem hibrida [24]. Selain itu, penerapan sistem manajemen karbon berbasis siklus hidup memungkinkan proses pemantauan dan evaluasi emisi dilakukan secara lebih sistematis melalui pendekatan manajemen berbasis data dan pemodelan karbon [25], [26].

Secara keseluruhan, konsumsi energi alat berat merupakan komponen penting dalam struktur emisi industri konstruksi, khususnya pada fase pelaksanaan. Meskipun tidak termasuk dalam *embodied carbon* material, kontribusinya terhadap total jejak karbon proyek tetap signifikan. Oleh karena itu, pengelolaan emisi pada tahap konstruksi perlu ditempatkan sebagai bagian integral dalam strategi dekarbonisasi sektor konstruksi di Indonesia.

Transportasi

Dalam kajian awal, transportasi dapat dipahami sebagai salah satu sumber emisi yang muncul karena material konstruksi tidak digunakan langsung di lokasi proyek, melainkan harus dipindahkan dari tempat produksi, pengolahan, hingga area pekerjaan. Hal ini terlihat pada penelitian Fistar tentang konstruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda yang menilai tahap produksi, transportasi, dan pelaksanaan dengan pendekatan LCA. Hasilnya menunjukkan bahwa pada perkerasan lentur, tahap transportasi menyumbang 17,42% emisi, sedangkan pada perkerasan kaku kontribusinya 14,41% [18]. Temuan ini menegaskan bahwa mobilisasi bahan bukan sekedar aktivitas pendukung, tetapi sudah menjadi komponen penting pembentuk jejak karbon proyek jalan. Sektor transportasi dalam proyek konstruksi diketahui memberikan kontribusi emisi yang signifikan akibat tingginya konsumsi energi dalam rantai distribusi material [27], yaitu sekitar 17,42% dari total emisi yang dihasilkan selama proses konstruksi.

Kontribusi ini terutama berasal dari aktivitas distribusi material yang melibatkan kendaraan berbahan bakar fosil dengan frekuensi perjalanan yang tinggi [18]. Emisi yang dihasilkan didominasi oleh karbon dioksida (CO₂) sebagai hasil utama pembakaran bahan bakar, disertai emisi lain seperti nitrogen oksida (NO_x) dan partikulat (PM) yang turut berkontribusi terhadap pencemaran udara [2], [13]. Dengan kata lain, semakin jauh jarak angkut material dan semakin intensif penggunaan kendaraan logistik, maka semakin besar emisi yang dilepaskan, terutama dalam sistem logistik material konstruksi yang belum efisien [28].

Gambaran tersebut kemudian dipertegas oleh penelitian Lendra *et al.* yang membagi proses pekerjaan jalan ke dalam tiga bagian utama, yaitu produksi campuran aspal panas, transportasi material, dan pelaksanaan pengaspalan [18]. Menariknya, transportasi tidak hanya diposisikan sebagai tahap antara, tetapi sebagai bagian yang erat kaitannya dengan pergerakan bahan baku dan campuran yang membutuhkan energi berbasis bahan bakar fosil. Pada tahap distribusi material berlangsung, kendaraan angkut menghasilkan berbagai jenis emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂), serta emisi lain seperti nitrogen oksida (NO_x) dan partikulat (PM) akibat proses pembakaran bahan bakar kendaraan [17], [2]. Emisi CO₂ menjadi kontributor terbesar karena dihasilkan langsung dari pembakaran bahan bakar fosil selama aktivitas transportasi material.

Selanjutnya, penelitian Matriks Teknik Sipil tahun 2023 pada proyek *Fly Over* Cakung memperlihatkan detail yang lebih konkret mengenai bagaimana transportasi masuk ke dalam unit proses konstruksi jalan. Penelitian ini mencatat adanya pengangkutan material menuju AMP dan distribusi campuran dari tahapan yang menghasilkan emisi. Walaupun produksi material tetap menjadi penyumbang

terbesar, keberadaan proses angkut menunjukkan bahwa emisi pada proyek konstruksi terbentuk melalui alur yang saling terhubung, mulai dari penyediaan bahan, perjalanan material, hingga pekerjaan di lapangan. Karena itu, jika topiknya adalah sumber emisi gas rumah kaca dalam industri konstruksi pada aspek transportasi, maka inti pembahasannya terletak pada konsumsi bahan bakar kendaraan angkut, frekuensi perjalanan, serta jarak distribusi material yang terus berulang selama proyek berlangsung [17].

Limbah Konstruksi

Limbah konstruksi merupakan salah satu isu lingkungan utama dalam sektor konstruksi yang berkaitan langsung dengan efisiensi penggunaan material dan keberlanjutan pembangunan. Limbah ini dihasilkan pada berbagai tahapan proyek, mulai dari konstruksi, renovasi, hingga pembongkaran bangunan. Jenis limbah yang dihasilkan meliputi beton, batu bata, kayu, logam, dan material lainnya yang tidak termanfaatkan secara optimal. Timbulnya limbah konstruksi umumnya disebabkan oleh perencanaan material yang kurang efisien, kesalahan desain, serta praktik pelaksanaan proyek yang belum optimal. Dalam konteks manajemen konstruksi modern, limbah tidak hanya dipandang sebagai residu fisik, tetapi juga sebagai indikator inefisiensi dalam penggunaan sumber daya material dalam siklus konstruksi [29], [30]. Selain itu, pengembangan database inventaris siklus hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*) material konstruksi menunjukkan bahwa setiap material memiliki profil dampak lingkungan yang berbeda, sehingga kehilangan material dalam bentuk limbah akan memperbesar total beban lingkungan yang tercatat dalam sistem inventaris tersebut [27].

Dari perspektif lingkungan, limbah konstruksi memiliki dampak yang signifikan karena berkontribusi terhadap peningkatan konsumsi sumber daya dan emisi gas rumah kaca. Setiap material yang terbuang merepresentasikan energi dan emisi karbon yang telah digunakan selama proses ekstraksi dan produksi. Studi berbasis *life cycle assessment* menunjukkan bahwa material konstruksi seperti beton dan baja memiliki kontribusi emisi yang tinggi pada tahap produksi, sehingga kehilangan material dalam bentuk limbah akan meningkatkan total jejak karbon secara tidak langsung [31], [32]. Dengan demikian, limbah konstruksi berkaitan erat dengan konsep *embodied carbon*, di mana pemborosan material berarti pemborosan emisi yang telah dihasilkan sebelumnya [33]. Hal ini juga diperkuat oleh studi mengenai jejak karbon struktur bangunan yang menunjukkan bahwa pemilihan material dan jumlah penggunaannya sangat menentukan besarnya emisi karbon total bangunan, sehingga limbah material akan memperburuk performa lingkungan secara keseluruhan [10], [9].

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian terhadap pengelolaan limbah konstruksi semakin meningkat seiring dengan upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor bangunan dan konstruksi. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meminimalkan limbah konstruksi, salah satunya melalui penerapan prinsip *reduce, reuse, dan recycle* (3R) dalam pengelolaan material. Strategi *reduce* dilakukan dengan meningkatkan efisiensi perencanaan dan penggunaan material sehingga dapat meminimalkan potensi limbah sejak tahap desain [1]. Strategi *reduce* difokuskan pada optimalisasi desain dan perencanaan material untuk meminimalkan timbunan limbah sejak awal proyek. Strategi *reuse* dilakukan dengan memanfaatkan kembali material atau komponen bangunan yang masih layak digunakan, sedangkan *recycle* dilakukan dengan mengolah limbah menjadi material baru, seperti agregat daur ulang dalam beton. Pendekatan ini terbukti dapat menurunkan kebutuhan material baru serta mengurangi emisi karbon melalui pemanfaatan material alternatif dan limbah sebagai bahan konstruksi [34], [35], [36].

Selain itu, konsep ekonomi sirkular dalam konstruksi (*circular construction*) mulai dikembangkan sebagai pendekatan yang lebih komprehensif dalam pengelolaan limbah. Pengelolaan limbah konstruksi juga memerlukan proses tambahan yang berkontribusi terhadap emisi, sebagaimana ditunjukkan dalam studi pengelolaan limbah berbasis sistem [37]. Konsep ini menekankan pada siklus material yang berkelanjutan melalui pengurangan limbah, penggunaan kembali, serta pemanfaatan ulang sumber daya dalam sistem konstruksi. Implementasi pendekatan ini dinilai mampu meningkatkan efisiensi material sekaligus menekan emisi karbon sektor konstruksi [38]. Namun, penerapannya masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan teknologi daur ulang, kurangnya integrasi dalam perencanaan proyek, serta rendahnya kesadaran industri terhadap praktik konstruksi berkelanjutan [4].

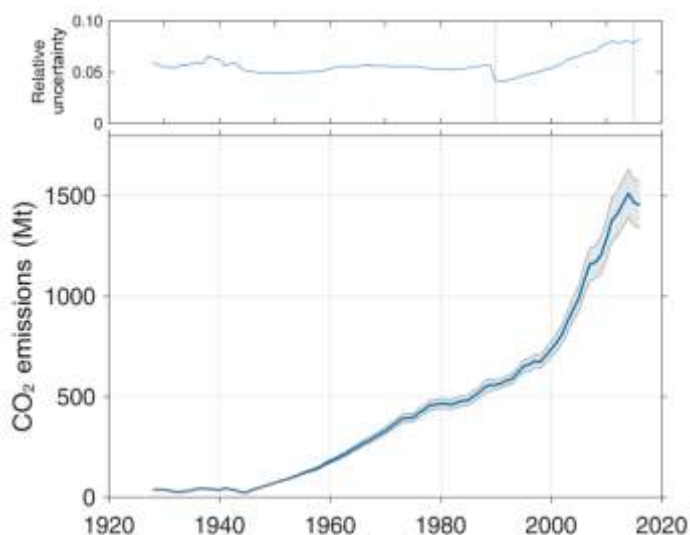
Secara keseluruhan, limbah konstruksi tidak hanya menjadi permasalahan pengelolaan lingkungan, tetapi juga mencerminkan ketidakefisienan penggunaan material dan energi dalam proyek konstruksi. Oleh karena itu, pengelolaan limbah yang efektif melalui pendekatan 3R dan konstruksi sirkular menjadi langkah strategis dalam mengurangi emisi gas rumah kaca serta mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan.

Kontribusi terhadap Emisi Nasional

Industri konstruksi memiliki kontribusi yang signifikan terhadap total emisi gas rumah kaca baik secara global maupun nasional karena sektor ini berkaitan langsung dengan produksi material, aktivitas pembangunan infrastruktur, serta konsumsi energi dalam berbagai tahap siklus hidup bangunan. Pada skala global, sektor bangunan dan konstruksi diperkirakan menyumbang lebih dari sepertiga emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari aktivitas manusia, terutama melalui produksi material konstruksi seperti semen dan baja serta penggunaan energi pada tahap konstruksi dan operasional bangunan [13].

Dalam konteks Indonesia, peningkatan emisi dari sektor konstruksi tidak terlepas dari pesatnya pembangunan infrastruktur dalam satu dekade terakhir. Program pembangunan jalan tol, pelabuhan, kawasan industri, serta pembangunan perkotaan telah meningkatkan kebutuhan material konstruksi secara signifikan. Kondisi ini menyebabkan peningkatan konsumsi energi dan material berintensitas karbon tinggi yang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon nasional seiring pertumbuhan kebutuhan material konstruksi [39].

Salah satu kontributor utama dalam sektor konstruksi terhadap emisi nasional adalah produksi semen. Secara global, produksi semen menyumbang sekitar 7-8% dari total emisi CO₂ dunia [12]. Mengingat tingginya konsumsi semen dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia, kontribusi ini secara tidak langsung tercermin dalam struktur emisi nasional, khususnya pada sektor industri dan energi yang mendukung produksi material konstruksi. Dengan kata lain, meskipun emisi dari semen tercatat dalam sektor industri, penggunaannya yang dominan dalam konstruksi menjadikan sektor ini sebagai pendorong utama peningkatan emisi tersebut.



Gambar 3. Tren Emisi CO₂ Global dari Produksi Semen

Sumber: Andrew, 2018

Gambar 3 menunjukkan tren peningkatan emisi CO₂ dari produksi semen secara global yang terus meningkat hingga mencapai lebih dari 1.500 Mt CO₂ per tahun. Tren ini menggambarkan bahwa peningkatan kebutuhan material konstruksi, termasuk di negara berkembang seperti Indonesia, berkontribusi terhadap kenaikan emisi secara signifikan. Hal ini memperkuat bahwa sektor konstruksi memiliki kontribusi tidak langsung namun dominan terhadap emisi karbon nasional melalui konsumsi material berintensitas tinggi.

Hubungan antara pertumbuhan pembangunan infrastruktur dan peningkatan emisi juga menunjukkan adanya keterkaitan erat antara perkembangan ekonomi, pembangunan fisik, dan tekanan lingkungan. Studi menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas konstruksi yang tidak diimbangi dengan strategi dekarbonisasi dapat meningkatkan intensitas emisi nasional [1]. Oleh karena itu, sektor konstruksi menjadi salah satu sektor strategis dalam upaya mitigasi perubahan iklim di Indonesia.

Selain itu, kontribusi emisi sektor konstruksi tidak hanya berasal dari aktivitas pembangunan di lapangan, tetapi juga dari rantai pasok material konstruksi yang memiliki intensitas karbon tinggi. Produksi semen, baja, serta transportasi material merupakan komponen utama yang membentuk jejak karbon sektor ini [13]. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi sektor konstruksi terhadap emisi nasional bersifat sistemik, mencakup seluruh tahapan dari hulu hingga hilir dalam rantai pasok material dan energi [40].

Dalam konteks kebijakan pembangunan nasional, sektor konstruksi memiliki peran penting dalam

pencapaian target penurunan emisi gas rumah kaca Indonesia. Upaya dekarbonisasi dapat dilakukan melalui penerapan teknologi konstruksi rendah karbon, penggunaan material alternatif, serta efisiensi energi dalam proses pembangunan. Namun implementasi strategi tersebut masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan teknologi, kesiapan industri, serta koordinasi antar pemangku kepentingan [4].

Secara keseluruhan, kontribusi sektor konstruksi terhadap emisi nasional menunjukkan bahwa transformasi menuju pembangunan rendah karbon merupakan kebutuhan yang mendesak. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur, sektor ini perlu diarahkan untuk tidak hanya mendukung pertumbuhan ekonomi, tetapi juga berkontribusi dalam pencapaian target pengurangan emisi gas rumah kaca Indonesia secara berkelanjutan.

Strategi Bangunan Hijau (*Green Building*)

Upaya mitigasi emisi gas rumah kaca pada industri konstruksi tidak hanya berfokus pada aktivitas proyek. Penelitian menunjukkan bahwa emisi langsung dari kegiatan konstruksi di lapangan yang mana relatif kecil dibandingkan emisi tidak langsung dari material mendominasi total emisi bangunan [14].

Berdasarkan hasil penelitian, strategi mitigasi harus difokuskan pada pengurangan emisi terwujud (*embodied emissions*), tidak hanya pada efisiensi energi operasional bangunan [13]. Upaya seperti mengurangi penggunaan semen dengan intensitas karbon tinggi, memanfaatkan bahan substitusi semen, seperti *fly ash*, serta meningkatkan penggunaan baja daur ulang. Karena produksi semen dan baja terbukti sebagai kontributor emisi terbesar dalam rantai pasok konstruksi, maka pengendalian pada material ini akan memberikan dampak besar terhadap total emisi bangunan.

Selain hal tersebut, penelitian menekankan pentingnya melihat sektor konstruksi secara menyeluruh melalui analisis rantai pasok [13]. Kondisi seperti ini sejalan dengan prinsip *green building* yang mempertimbangkan siklus hidup bangunan secara utuh. Dengan menerapkan desain yang lebih efisien dan mengoptimalkan penggunaan material, kebutuhan terhadap material beremisi tinggi dapat ditekan sejak tahap perencanaan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi sumber daya dalam pembangunan.

Menurut Lokesh *et al.*, penerapan *green building* tidak hanya menitikberatkan pada efisiensi energi operasional, tetapi juga pada pemilihan material bangunan yang memiliki jejak karbon rendah melalui pendekatan *life cycle assessment* (LCA) [41]. Material seperti *geopolymer concrete* dan material berbasis kayu dapat menurunkan emisi karbon secara signifikan [42], [43], [44]. Pendekatan ini menunjukkan bahwa pengurangan emisi harus dilakukan sejak tahap perencanaan desain, bukan hanya pada saat bangunan beroperasi.

Selain itu, Chamasemani *et al.* menjelaskan bahwa penggunaan material berkelanjutan pada bangunan beton bertulang mampu menurunkan dampak lingkungan secara signifikan, khususnya pada kategori *global warming potential* (GWP) [16]. Pengurangan emisi ini dipengaruhi oleh efisiensi penggunaan material, pengurangan volume semen, serta pemanfaatan material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Oleh karena itu, strategi *green building* perlu diarahkan pada optimasi desain dan pemilihan material rendah karbon agar target pembangunan berkelanjutan dapat tercapai secara efektif.

Substitusi Material

Substitusi material merupakan salah satu strategi yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca pada sektor konstruksi. Strategi ini dilakukan dengan mengganti material konvensional yang memiliki intensitas karbon tinggi dengan material alternatif yang memiliki jejak karbon lebih rendah tanpa mengurangi fungsi struktural bangunan. Dalam industri konstruksi, material seperti semen dan beton diketahui menjadi kontributor utama emisi karbon karena proses produksinya yang membutuhkan energi tinggi dan menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar [12], [36].

Pada produksi semen, khususnya semen Portland, merupakan salah satu sumber emisi karbon terbesar dalam sektor konstruksi. Proses kalsinasi batu kapur pada pembuatan klinker menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah signifikan selain emisi yang berasal dari penggunaan energi pada proses produksi. Oleh karena itu, berbagai penelitian menekankan pentingnya upaya pengurangan penggunaan semen melalui substitusi material atau penggunaan bahan tambahan yang lebih ramah lingkungan [32]. Pendekatan ini dapat dilakukan dengan mengganti sebagian komponen semen dengan material alternatif atau menggunakan sistem struktur yang memerlukan volume beton lebih sedikit.

Selain pada material semen, substitusi juga dapat dilakukan pada pemilihan sistem struktur bangunan. Perbandingan antara struktur beton bertulang dan struktur baja menunjukkan bahwa perbedaan jenis material konstruksi dapat memengaruhi jumlah emisi karbon yang dihasilkan selama siklus hidup bangunan [15]. Analisis perbandingan menunjukkan bahwa pemilihan material struktur yang lebih efisien

dapat menurunkan total emisi karbon pada tahap konstruksi maupun selama siklus hidup bangunan [11].

Pada tahap konstruksi, penggunaan material yang memiliki intensitas energi tinggi dapat berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Studi pada proyek konstruksi jalan menunjukkan bahwa konsumsi energi dari penggunaan material konstruksi dan aktivitas alat berat menjadi salah satu penyumbang utama emisi pada tahap pembangunan infrastruktur [2]. Oleh karena itu, penggunaan material alternatif yang lebih efisien secara energi serta optimalisasi proses produksi material konvensional seperti bata melalui pendekatan dekarbonisasi berbasis LCA [45].

Dalam pembangunan berkelanjutan, substitusi material menjadi bagian dari strategi dekarbonisasi sektor infrastruktur. Upaya ini dapat dilakukan melalui penggunaan material rendah karbon, peningkatan efisiensi material, serta penerapan inovasi teknologi dalam proses konstruksi serta solusi teknis untuk menurunkan jejak karbon struktur [46]. Namun, penerapan cara ini masih menghadapi berbagai tantangan, seperti kesiapan industri dan hambatan implementasi efisiensi bangunan [47], keterbatasan teknologi, biaya awal yang relatif tinggi, serta kurangnya regulasi yang mendorong penggunaan material ramah lingkungan [4]. Oleh karena itu, dukungan kebijakan seperti insentif atau penerapan mekanisme ekonomi lingkungan, termasuk pajak karbon, dapat menjadi pendorong bagi industri konstruksi untuk beralih ke material dengan emisi yang lebih rendah [5].

Semen Rendah Karbon (*Low-Carbon Cement*)

Semen merupakan salah satu material utama dalam industri konstruksi yang memiliki kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca secara global. Produksi semen, khususnya semen Portland, menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar yang berasal dari proses kalsinasi batu kapur serta penggunaan energi dalam proses produksi. Secara global, industri semen menyumbang sekitar 5–8% dari total emisi karbon dioksida (CO₂) dunia, sehingga sektor ini menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon global akibat proses produksi klinker, serta menjadi fokus utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim pada industri konstruksi [6], [12].

Semen rendah karbon (*low-carbon cement*) merupakan inovasi material yang dirancang untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi semen. Pendekatan ini dapat dilakukan dengan mengurangi rasio klinker dalam komposisi semen, menggunakan bahan tambahan mineral dan material *geopolymer* rendah karbon yang memiliki performa termal dan emisi lebih rendah [48], meningkatkan efisiensi energi dalam proses produksi, serta memanfaatkan teknologi yang lebih ramah lingkungan. Upaya tersebut dilakukan dengan tujuan menurunkan intensitas emisi CO₂ per ton semen yang diproduksi tanpa mengurangi kinerja teknis material tersebut dalam aplikasi konstruksi [7].

Dalam industri konstruksi, penggunaan semen rendah karbon menjadi salah satu strategi dalam upaya dekarbonisasi sektor infrastruktur. Penelitian mengenai dekarbonisasi infrastruktur menunjukkan bahwa pengembangan material konstruksi yang memiliki intensitas karbon lebih rendah, termasuk semen rendah karbon, merupakan salah satu peluang utama untuk mengurangi emisi pada sektor konstruksi. Namun, penerapan cara ini masih menghadapi beberapa tantangan, seperti keterbatasan teknologi produksi, kesiapan industri, serta faktor biaya yang masih relatif tinggi dibandingkan dengan material konvensional [4].

Pada tahap pelaksanaan konstruksi, konsumsi energi yang terkait dengan produksi dan penggunaan material dapat berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca. Penelitian pada proyek konstruksi infrastruktur menunjukkan bahwa penggunaan material dengan intensitas energi tinggi dapat meningkatkan total emisi selama proses pembangunan [2]. Oleh karena itu, penggunaan material yang lebih efisien secara energi, termasuk semen rendah karbon, dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas konstruksi.

Selain inovasi teknologi, kebijakan dan regulasi memiliki peran dalam mendorong penerapan material rendah karbon dalam industri konstruksi. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah dengan menerapkan kebijakan ekonomi lingkungan, seperti pajak karbon, yang dapat mendorong industri untuk mengurangi emisi dan beralih pada teknologi serta material yang lebih ramah lingkungan [5]. Dengan adanya dukungan kebijakan dan inovasi teknologi, penggunaan semen rendah karbon diharapkan dapat menjadi salah satu langkah strategis dalam mengurangi emisi karbon dari sektor konstruksi secara berkelanjutan.

Konstruksi Sirkular (*Circular Construction*)

Konstruksi sirkular merupakan pendekatan pembangunan yang mengadopsi prinsip ekonomi sirkular dengan tujuan mengurangi penggunaan sumber daya primer serta menekan emisi gas rumah kaca sepanjang siklus hidup bangunan. Pendekatan ini menekankan optimalisasi penggunaan material melalui strategi

reduce, reuse, dan recycle, sehingga kebutuhan terhadap material baru yang memiliki *embodied carbon* tinggi seperti semen dan baja dapat diminimalkan [49], [50].

Dalam perspektif penilaian daur hidup LCA, sebagian besar emisi pada sektor konstruksi berasal dari tahap produksi material dan pengolahan limbah akhir bangunan. Oleh karena itu, penerapan konstruksi sirkular berpotensi menurunkan emisi secara signifikan melalui substitusi material baru dengan material hasil daur ulang serta optimalisasi desain modular yang memungkinkan pembongkaran selektif [41].

Strategi ini juga mencakup pemanfaatan material alternatif rendah karbon seperti *geopolymer*, agregat daur ulang, dan material berbasis limbah industri yang terbukti mampu menekan potensi pemanasan global dibandingkan material konvensional berbasis semen Portland [31]. Selain itu, integrasi sistem manajemen limbah konstruksi berbasis teknologi Industri 4.0 dapat meningkatkan efisiensi aliran material serta mengurangi timbunan limbah yang berkontribusi terhadap emisi tidak langsung (*indirect emissions*) [30].

Secara global, transisi menuju konstruksi sirkular juga dipandang sebagai bagian dari upaya mencapai target *net-zero carbon construction*, di mana optimalisasi penggunaan material dan efisiensi sumber daya menjadi faktor kunci dalam menurunkan jejak karbon proyek [24]. Dalam konteks Indonesia, penerapan prinsip konstruksi sirkular memiliki urgensi yang tinggi mengingat pesatnya pembangunan infrastruktur nasional dan meningkatnya kebutuhan material konstruksi yang berkontribusi terhadap emisi sektor ini.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur terhadap berbagai publikasi ilmiah dalam satu dekade terakhir, sektor konstruksi terbukti menjadi salah satu kontributor signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global. Kontribusi tersebut terutama berasal dari tingginya intensitas karbon pada produksi material konstruksi utama seperti semen dan baja, penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil pada aktivitas konstruksi, serta rantai pasok material yang melibatkan proses transportasi dan distribusi dengan konsumsi energi yang besar. Selain itu, tingginya timbunan limbah konstruksi menunjukkan adanya inefisiensi dalam pemanfaatan material yang pada akhirnya memperbesar jejak karbon yang dihasilkan sepanjang siklus hidup proyek konstruksi.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa upaya mitigasi emisi pada sektor konstruksi memerlukan pendekatan yang komprehensif dan berbasis siklus hidup bangunan. Strategi yang banyak direkomendasikan dalam literatur meliputi penerapan prinsip *green building*, pengembangan dan penggunaan material konstruksi rendah karbon, optimalisasi efisiensi energi dalam proses konstruksi, serta penerapan konsep konstruksi sirkular melalui pendekatan *reduce, reuse, dan recycle* pada material bangunan. Integrasi strategi tersebut berpotensi menekan emisi karbon secara signifikan sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan di Indonesia, implementasi berbagai strategi mitigasi tersebut masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan teknologi, kesiapan industri konstruksi, serta dukungan kebijakan yang belum sepenuhnya terintegrasi. Oleh karena itu, diperlukan sinergi antara inovasi teknologi, penguatan regulasi, serta peningkatan kesadaran dan komitmen para pemangku kepentingan di sektor konstruksi. Dengan demikian, transformasi menuju praktik konstruksi rendah karbon dapat diwujudkan secara lebih efektif dan berkontribusi nyata terhadap upaya pengurangan emisi gas rumah kaca serta pencapaian target pembangunan berkelanjutan di masa mendatang.

5. Referensi

- [1] M. Tampubolon, "The Impact of CO₂ Emissions in Indonesia's Construction Industry: A Human Development Perspective," Jan. 22, 2025. doi: 10.20944/preprints202501.1668.v1.
- [2] A. Mulyana and R. D. Wirahadikusumah, "Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Tahap Konstruksi Studi Kasus : Konstruksi Jalan Cisumdawu," *J. Tek. Sipil ITB*, vol. 24, no. 3, pp. 269–280, 2017, doi: 10.5614/jts.2017.24.3.10.
- [3] Deffitania Olivia and Bambang Endro Yuwono, "Identification of Carbon Footprint in The Cast in Situ Pile, Case Study: GBK Indoor Multifunction Stadium," *Int. J. Livable Sp.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, Aug. 2023, doi: 10.25105/livas.v7i1.16793.
- [4] L. Hidayat, M. I. Ramadhan, M. T. Tasliman, and A. Octora, "Decarbonizing Infrastructure in Indonesia: Opportunities, Barriers, and Stakeholder Perspectives," *J. Infrastruct. Policy Manag.*, vol. 8, no. 2, pp. 139–158, Nov. 2025, doi: 10.35166/jipm.v8i2.130.

- [5] M. Wimala and J. Jeremy, "Potensi Penerapan Kebijakan Carbon Tax pada Industri Konstruksi Indonesia," *Teras J. J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 1, pp. 295–306, Apr. 2022, doi: 10.29103/tj.v12i1.663.
- [6] A. Mostafa, H. Khater, M. Gharieb, and M. Anwar, "Sustainable Cement Production: Minimizing CO₂ by Optimizing Efficiency with LC₃," *Discov. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 7, 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07298-2.
- [7] R. T. A. Harijanto, K. Dewi, and A. Wahyudi, "Quantification of Greenhouse Gas Emissions in a Cement Company and System Dynamics Modelling Toward Carbon Neutral," *J. Community Based Environ. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 1, pp. 11–24, Dec. 2024, doi: 10.23969/jcbeem.v9i1.20395.
- [8] J. Evans, "Towards Net Zero by Data-Driven Discovery of Sustainable Cement Alternatives," *Commun. Chem.*, vol. 8, no. 1, p. 213, 2025, doi: 10.1038/s42004-025-01608-w.
- [9] V. Sviridenko, "Monitoring of Building Carbon Footprint at Different Construction Stages Depending on Building Materials Selection," *Eurasian Sci. J.*, vol. 17, no. 5, 2025, doi: 10.15862/49nzvn525.
- [10] J. Budajová, "Carbon Footprint of Selected Building Structures," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1209, no. 1, p. 12015, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1209/1/012015.
- [11] Z. X. Chew, Y. H. Tang, and J. Y. Wong, "Comparative Analysis of Carbon Emissions Between Reinforced Concrete and Steel Structures in a Low-Rise Commercial Building," *IEM J.*, vol. 86, no. 3, Nov. 2025, doi: 10.54552/v86i3.268.
- [12] R. M. Andrew, "Global CO₂ Emissions from Cement Production," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, no. 1, pp. 195–217, Jan. 2018, doi: 10.5194/essd-10-195-2018.
- [13] R. H. Crawford, "Greenhouse Gas Emissions of Global Construction Industries," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1218, no. 1, p. 012047, Jan. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1218/1/012047.
- [14] J. He, Q. Meng, and H. Xu, "Exploring Material Selection and Applications for Embedded Carbon Reduction in the Built Environment," *SSRN Electron. J.*, 2025, doi: 10.2139/ssrn.5073131.
- [15] E. Chabi, T. Amadji, D. Deguenon, and E. Adjovi, "Comparative Study of the Carbon Footprint of an Eco-Material Ribbed Slab and a Reinforced Concrete Ribbed Slab," *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 23, no. 3, pp. 1184–1190, 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.23.3.2577.
- [16] N. F. Chamasemani, M. Kelishadi, H. Mostafaei, M. A. D. Najvani, and M. Mashayekhi, "Environmental Impacts of Reinforced Concrete Buildings: Comparing Common and Sustainable Materials: A Case Study," *Constr. Mater.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–15, Dec. 2023, doi: 10.3390/constrmater4010001.
- [17] K. Soeryodarundio, S. Setiono, and D. R. Daniswara, "Analisis Emisi Gas Rumah Kaca dengan Pendekatan Life Cycle Assessment pada Tahap Konstruksi Perkerasan Lentur Fly Over Cakung," *Matriks Tek. Sipil*, vol. 11, no. 1, p. 24, Dec. 2023, doi: 10.20961/mateksi.v11i1.65852.
- [18] L. Lendra, A. B. P. Gawei, and L. Sintani, "Analisis Konsumsi Energi dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Pekerjaan Konstruksi Jalan dengan Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku," *J. Reka Lingkungan*, vol. 10, no. 3, pp. 201–211, Nov. 2022, doi: 10.26760/rekalingkungan.v10i2.165-176.
- [19] O. Alomari, A. Alkhdor, M. Al-Rawashdeh, M. Al-Ruwaishedi, and S. Al Rawashdeh, "Evaluating Carbon Footprint in the Life Cycle Design of Residential Concrete Structures in Jordan," *Civ. Eng. J.*, vol. 9, no. 7, pp. 1646–1659, 2023, doi: 10.28991/cej-2023-09-07-07.
- [20] A. Sharma, "Reducing Carbon Emissions in Construction Through Lean Practices and Sustainable Materials," *Zenodo (CERN Eur. Organ. Nucl. Res.)*, 2025, doi: 10.5281/zenodo.17874874.
- [21] M. A. Dorosti, F. Saiedi, and S. Yousefi, "Identifying Contractors' Competency Criteria in Construction Projects on Kish Island from a Sustainable Development Perspective: A Thematic Analysis," *Shil. Rev. Lepidopterol.*, 2025.
- [22] M. Jahandideh, A. Mahmoudi, S. Rashidi, M. S. Valipour, and S. Zirak, "Leveraging Renewable Energy for Mitigating Greenhouse Gas Emissions in Iran," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 30, p. 101632, May 2026, doi: 10.1016/j.ecmx.2026.101632.
- [23] X. Hui *et al.*, "How Biogas Slurry Irrigation Replacing Chemical Fertilizers Affects Farmland Greenhouse Gas Emissions—In-Depth Exploration with a Meta-Analysis," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 41, p. 104789, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.eti.2026.104789.
- [24] A. Abdullah, L. Yusof, and R. Rahman, "Indicators, Challenges and Strategies in Implementing Net-Zero Carbon Construction Projects," *Plan. MALAYSIA*, vol. 22, 2024, doi: 10.21837/pm.v22i32.1509.
- [25] M. Chhatwani, "Model-Driven Management of Construction Carbon Footprint," *Illinois Digit. Environ. Access to Learn. Scholarsh. (University Illinois Urbana-Champaign)*, 2015.

- [26] M. Krutilova, A. Naumov, and B. Строкова, "Life Cycle Low-Carbon Management System Improvement of the Integrated Development of Buildings," *Constr. Archit.*, vol. 11, no. 2, p. 3, 2023, doi: 10.29039/2308-0191-2023-11-2-3-3.
- [27] I. Nouhoun, P. Nshimiyimana, C. Hema, and A. Messan, "Development of a Life Cycle Inventory Database for Environmental Impact Assessment of Construction Materials in Burkina Faso," *Sustainability*, vol. 17, no. 2, p. 471, 2025, doi: 10.3390/su17020471.
- [28] E. Rea and L. Narváez, "Propuesta de disminución de huella de carbono para construcción de edificaciones. Caso de estudio: Edificio de Ciencias Básicas de la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.," *Investig. y Desarro.*, vol. 15, no. 1, pp. 19–31, 2022, doi: 10.31243/id.v15.2022.1589.
- [29] S. Gosling and D. Tingley, "Optimising the Balance Between Flexibility and Structural Mass for Lower Short- and Long-Term Embodied Carbon Emissions in Mass Housing," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1078, no. 1, p. 12042, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1078/1/012042.
- [30] M. Musarat, W. Alaloul, N. Hameed, R. Dhinakaran, A. Qureshi, and M. Wahab, "Efficient Construction Waste Management: A Solution through Industrial Revolution (IR) 4.0 Evaluated by AHP," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 274, 2022, doi: 10.3390/su15010274.
- [31] S. H. Teh, T. Wiedmann, A. Castel, and J. de Burgh, "Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymers concrete in Australia," *J. Clean. Prod.*, vol. 152, pp. 312–320, May 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.122.
- [32] B. D. Akintayo, O. A. Olanrewaju, and O. I. Olanrewaju, "Life Cycle Assessment of Ordinary Portland Cement Production in South Africa: Mid-Point and End-Point Approaches," *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 3001, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16073001.
- [33] E. Hoxha *et al.*, "Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods," *Build. Cities*, vol. 1, no. 1, pp. 504–524, Aug. 2020, doi: 10.5334/bc.46.
- [34] S. Anjani, G. Shyamala, K. Kumar, and S. Sahu, "Ecofriendly Building Blocks for Sustainable Construction," *E3S Web Conf.*, vol. 619, p. 3019, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202561903019.
- [35] K. E., M. K., A. G.E., and U. R., "Development of sustainable masonry solid blocks by the incorporation of industrial and agro waste.," *Glob. NEST J.*, Feb. 2024, doi: 10.30955/gnj.005559.
- [36] A. Gupta, S. Kumar, N. Gupta, and S. Pal, "Investigation of the impact of eco-friendly building materials on carbon footprints of an affordable housing in hilly region," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1116, no. 1, p. 12163, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1116/1/012163.
- [37] A. McGushin *et al.*, "Interventions to reduce greenhouse gas emissions from health-system solid waste: a systematic review," *Lancet Planet. Heal.*, p. 101418, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.lanplh.2025.101418.
- [38] S. Sinha and S. Sethuraman, "Building a Greener Future: How Earth Blocks Are Reshaping Sustainability and Circular Economy in Construction," *Architecture*, vol. 5, no. 2, p. 25, 2025, doi: 10.3390/architecture5020025.
- [39] L. Gozali, K. V. Liu, A. Adianto, S. R. Nasution, and C. O. Doaly, "Greenhouse gas emission forecasting analysis in Jakarta towards net zero emissions in 2050," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 13, p. 101315, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101315.
- [40] Y. Yi, L. Lv, and Y. Chen, "Assessing the impact of global soybean trade on reducing greenhouse gas emissions," *J. Integr. Agric.*, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.jia.2026.02.034.
- [41] B. Lokesh, V. Pavadeppagol, and A. Chaitra, "Life cycle assessment of green building materials," *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 8, no. 2, pp. 392–397, 2020, doi: 10.30574/wjarr.2020.8.2.0386.
- [42] W. Lokuge, J. Sanjayan, and S. Setunge, "Use of geopolymers concrete in column applications," *Univ. South. Queensl. ePrints (University South. Queensland)*, 2015.
- [43] A. Oudjehane and J. Hamad, "Building a Greener Future: The Compelling Sustainability Case for Mass Timber Construction," *J. Sustain. Dev.*, vol. 18, no. 6, p. 12, 2025, doi: 10.5539/jsd.v18n6p12.
- [44] S. Delehan, S. Vilčeková, H. Melehanych, E. Burdová, and A. Khorolskyi, "A comparative assessment of the capabilities and success of the wood construction industry in Slovakia and Ukraine based on life cycle assessment certification standards," *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1319823.
- [45] B. Gazeau, L. Klemann, A. Zaman, and A. Sanches-Pereira, "Life Cycle Assessment of the Decarbonisation Opportunities of a Brick Manufacturing Facility in Australia," *CIB Conf.*, vol. 1, no. 1, 2025, doi: 10.7771/3067-4883.1838.
- [46] A. Grandclerc and T. Jousselein, "Technical solutions for reducing CO₂ footprint in MSE wall constructions," *E3S Web Conf.*, vol. 644, p. 1001, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202564401001.

-
- [47] O. Oguntona, B. Maseko, C. Aigbavboa, and W. Thwala, "Barriers to retrofitting buildings for energy efficiency in South Africa," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 640, no. 1, p. 12015, 2019, doi: 10.1088/1757-899x/640/1/012015.
- [48] A. Bąk, J. Piątkowski, P. Romańska, M. Łach, and A. Masłoń, "Low-Carbon Insulating Geopolymer Binders: Thermal Properties," *Sustainability*, vol. 17, no. 15, p. 6898, 2025, doi: 10.3390/su17156898.
- [49] P. Bhadane and P. D. Nemade, "Assessment of Circular Economy and Reduction of Embodied Carbon Drive for Sustainable Construction," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 10, no. 07, pp. 357–365, 2022, doi: 10.21474/ijar01/15042.
- [50] A. Merino-Lechuga *et al.*, "Technical and environmental assessment of CO₂-cured alkali-activated pervious paving blocks incorporating recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 489, p. 142286, 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142286.