

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri konstruksi salah satu sektor utama yang berperan dalam menghasilkan emisi gas rumah kaca di tingkat dunia. Bukti empiris terkini menunjukkan bahwa lingkungan konstruksi secara keseluruhan menyumbang sekitar 38–40% dari total emisi gas rumah kaca global, meliputi seluruh tahapan siklus hidup aset terbangun mulai dari produksi material, aktivitas konstruksi, operasional bangunan, hingga akhir masa pakai (Hagras et al., 2026). Berdasarkan laporan *Global Alliance for Buildings and Construction*, sekitar 11% emisi karbon pada sektor bangunan dihasilkan dari tahapan non-operasional, terutama yang berkaitan dengan pemilihan dan penggunaan material konstruksi (Wicaksono & Bayuaji, 2025).

Indonesia sendiri berkomitmen dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan tercermin melalui Strategi Nasional *Net Zero Emission 2060* (Kementerian PPN/Bappenas, 2025) serta Peraturan Menteri PUPR Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penilaian Kinerja Bangunan Gedung Hijau. Kebijakan tersebut mendorong penerapan praktik konstruksi yang berorientasi pada efisiensi karbon sejak tahap perencanaan dan perancangan bangunan. Pergeseran paradigma ini menempatkan analisis *embodied carbon* pada tahap desain awal sebagai intervensi yang paling efektif dan berdampak tinggi dalam strategi dekarbonisasi konstruksi.

Di antara seluruh material konstruksi, beton bertulang merupakan penyumbang utama *embodied carbon* pada bangunan gedung. Analisis meta terhadap 100 proyek sertifikasi G-SEED di Korea Selatan mengungkapkan bahwa beton saja menyumbang lebih dari 85% dari total massa material bangunan, yang secara langsung berkorelasi dengan intensitas emisi karbon material (Seo et al., 2025). Produksi semen sebagai komponen inti beton berkontribusi sekitar 7–8% dari total emisi CO₂ global, dengan sekitar 60% dari angka tersebut bersumber dari produksi 14 miliar ton beton setiap tahunnya (Paknahad et al., 2025). Selain itu, produksi

sekitar 400 juta ton baja tulangan per tahun untuk konstruksi beton bertulang menambah 1,5% dari emisi karbon global (Paknahad et al., 2025). Fakta ini menggaris bawahi urgensi pendekatan desain yang tidak hanya mempertimbangkan kekuatan struktural, tetapi juga secara eksplisit mengoptimalkan jejak karbon dari material beton bertulang yang digunakan.

Penelitian-penelitian terdahulu mengidentifikasi bahwa mutu beton secara langsung mempengaruhi besaran *embodied carbon* melalui dua mekanisme yang berlawanan: peningkatan mutu beton meningkatkan kandungan semen per satuan volume sehingga meningkatkan intensitas emisi per unit material, namun di sisi lain memungkinkan pengurangan dimensi penampang sehingga mengurangi total volume material yang digunakan (Nukah et al., 2022). *Global Cement and Concrete Association* (GCCA) juga menegaskan bahwa efisiensi desain dan konstruksi merupakan salah satu strategi paling berdampak, berpotensi mencapai 22% dari target reduksi emisi yang diperlukan untuk mencapai *net-zero carbon* di sektor beton pada 2050 (Paknahad et al., 2025).

Studi komparatif pada sistem pelat beton bertulang dengan variasi *grade* beton C25/30 hingga C40/50 menunjukkan bahwa optimasi pemilihan sistem struktural dan mutu beton mampu mengurangi *embodied carbon* hingga 25–35% dan biaya konstruksi hingga 15% dibandingkan desain konvensional (Paknahad et al., 2025). Studi lain yang membandingkan berbagai sistem rangka bangunan memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa optimasi desain melalui prinsip "*Build with Less*" mampu mencapai reduksi *embodied carbon* hingga 35,56% (Huang et al., 2023). Temuan-temuan ini secara kolektif menegaskan bahwa kajian *embodied carbon* berbasis variasi mutu beton dan optimasi dimensi merupakan area penelitian yang krusial namun masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut, khususnya pada konteks bangunan bertingkat di negara berkembang seperti Indonesia.

Selain isu keberlanjutan lingkungan, pada proyek-proyek konstruksi di Indonesia juga menghadapi tantangan fundamental dalam perencanaan proyek metode konvensional, keterbatasan ini berujung pada ketidakefisienan yang signifikan dari segi waktu, mutu, dan biaya (Salma et al., 2024). Kondisi ini menuntut transformasi pendekatan perencanaan menuju platform digital yang

terintegrasi. *Building Information Modeling* (BIM) telah terbukti secara empiris sebagai solusi transformatif yang mampu mengatasi keterbatasan metode konvensional tersebut. BIM merupakan sistem pengelolaan informasi digital mengenai karakteristik fisik dan fungsi bangunan yang mengintegrasikan seluruh data proyek dalam satu model terpadu (Wisdianti et al., 2024). Implementasi BIM dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek terbukti meningkatkan kualitas manajemen proyek dari segi waktu, mutu, dan biaya (Khatimi & Pardosi, 2022). BIM juga memungkinkan analisis multidimensi melalui integrasi model 3D dengan dimensi waktu, biaya, keselamatan, dan penggunaan energi dalam konsep *nD BIM* (Farhana et al., 2022). Lebih jauh, riset terkini menunjukkan bahwa BIM berfungsi sebagai alat yang sangat berharga untuk praktik konstruksi berkelanjutan, karena memungkinkan evaluasi emisi karbon sebelum tahap konstruksi dimulai serta memberikan dasar bagi pengendalian desain rendah karbon secara proaktif (Myint & Shafique, 2024). Penelitian di Myanmar menunjukkan bahwa kuantifikasi *material embodied carbon* menggunakan pendekatan berbasis BIM menghasilkan pengurangan emisi karbon material hingga 40% dan penurunan jejak karbon transportasi sebesar 39% melalui substitusi material rendah karbon, meski hanya disertai peningkatan biaya sebesar 6,7% (Myint & Shafique, 2024).

Kesenjangan tersebut semakin relevan ketika dihadapkan pada kasus nyata di lapangan, salah satunya adalah pembangunan Gedung Unit C.3 Mess Tenaga Kerja Asing (TKA) PT. Formosa Bag Indonesia di Kabupaten Grobogan. Bangunan ini merupakan gedung bertingkat 6 lantai dengan fungsi hunian yang struktur utamanya menggunakan sistem beton bertulang konvensional direncanakan menggunakan metode konvensional tanpa integrasi platform *Building Information Modeling* (BIM). Berdasarkan *Detail Engineering Design* (DED) eksisting yang diperoleh dari PT. ACE Engineering and Construction selaku kontraktor, seluruh elemen struktur direncanakan menggunakan mutu beton tunggal $f'_c = 25$ MPa. Evaluasi ulang yang dilakukan oleh peneliti terhadap DED eksisting menggunakan perangkat lunak *ETABS* dengan mengacu pada standar SNI 1726-2019 dan SNI 2847-2019 mengidentifikasi bahwa sejumlah elemen struktur eksisting tidak memenuhi ketentuan kapasitas dan pendetailan Sistem Rangka Pemikul Momen

Khusus (SRPMK) menurut SNI 2847-2019, meliputi kapasitas lentur dan geser balok, interaksi torsi, luas tulangan pengekangan kolom, serta kuat geser hubungan balok-kolom. Ketidakpemenuhan pada tingkat elemen tersebut menjadikan perencanaan ulang sebagai suatu keharusan teknis. Perencanaan ulang tersebut sekaligus menjadi basis kajian pengaruh variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* pada bangunan yang diteliti.

Namun, perencanaan ulang ini tidak berhenti hanya pada pemenuhan persyaratan kekuatan dan ketahanan struktural. Di sinilah letak pergeseran paradigma yang menjadi inti penelitian ini. Setiap keputusan perencana mulai dari pemilihan sistem struktur, penentuan mutu beton, hingga penetapan dimensi elemen struktural tidak hanya berdampak pada keandalan mekanis bangunan, tetapi secara bersamaan menentukan besaran *embodied carbon*. Dengan demikian, perencanaan ulang struktur merupakan titik keputusan (*decision point*) yang paling strategis untuk mengintegrasikan pertimbangan keberlanjutan lingkungan ke dalam proses rekayasa struktural, bukan sebagai beban tambahan melainkan sebagai dimensi penilaian yang setara dengan aspek kekuatan dan efisiensi biaya.

Meski demikian, penelitian-penelitian terdahulu masih menyisakan kesenjangan yang belum terjawab. Studi Paknahad et al., (2025) menganalisis pengaruh variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* pada sistem pelat, namun tidak mengintegrasikannya dengan platform BIM 5D. Penelitian Myint & Shafique, (2024) menggunakan pendekatan berbasis BIM untuk kuantifikasi *embodied carbon*, namun terfokus pada jenis material alternatif. Huang et al., (2023) mendemonstrasikan potensi reduksi *embodied carbon* melalui optimasi desain struktural, namun dalam konteks material rangka ringan, bukan beton bertulang konvensional. Kesenjangan penelitian yang nyata ini menjadi landasan urgensi penelitian yang diusulkan. Hingga saat ini, belum ada penelitian yang secara eksplisit memposisikan analisis *embodied carbon* sebagai bagian integral dari proses pengambilan keputusan desain yang secara integratif mengkaji pengaruh variasi mutu beton dan optimasi dimensi elemen struktural terhadap *embodied carbon* dalam kerangka BIM 5D pada bangunan bertingkat di Indonesia.

Berdasarkan uraian yang telah disebutkan, terdapat beberapa justifikasi yang mendasari penelitian ini. Pertama, secara empiris terdapat identifikasi bahwa sejumlah elemen struktur eksisting tidak memenuhi ketentuan kapasitas dan pendetailan SRPMK menurut SNI 2847-2019. Kondisi ini menjadikan perencanaan ulang sebagai suatu alternatif, sekaligus sebagai pertimbangan pengambilan keputusan desain yang lebih menyeluruh dan berwawasan ke depan. Kedua, secara global dan nasional terdapat urgensi dekarbonisasi sektor konstruksi yang menempatkan *embodied carbon* sebagai variabel desain yang tidak dapat diabaikan, mengingat dominasi beton bertulang sebagai material utama bangunan ini. Ketiga, secara ilmiah terdapat kesenjangan penelitian antara BIM 5D, analisis *embodied carbon*, variasi mutu beton, dan optimasi dimensi dalam satu kerangka studi yang kohesif. Penelitian ini dengan demikian mengusulkan pendekatan integratif melalui perencanaan ulang struktur Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia dengan integrasi BIM 5D dan analisis *embodied carbon* berdasarkan perbandingan variasi mutu beton $f'c = 25$ MPa, $f'c = 30$ MPa, dan $f'c = 35$ MPa serta optimasi dimensi elemen struktural, menggunakan bantuan perangkat lunak *ETABS*, *Autodesk Revit*, *Autodesk Navisworks*, dan *Microsoft Project*.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan pemaparan diatas, identifikasi masalah penelitian sebagai berikut:

1. Metode perencanaan konstruksi bersifat konvensional yang masih dominan di Indonesia mengakibatkan fragmentasi informasi, ketidakakuratan perhitungan volume, dan ketidakefisienan dari segi waktu, mutu, dan biaya proyek.
2. Implementasi BIM 5D yang mengintegrasikan pemodelan 3D, penjadwalan (4D), dan estimasi biaya (5D) masih belum banyak diterapkan secara komprehensif dalam proyek-proyek konstruksi bangunan bertingkat di Indonesia.
3. Belum mempertimbangkan analisis *embodied carbon* ke dalam alur kerja perencanaan struktur bangunan beton bertulang di Indonesia, padahal sektor konstruksi menyumbang sekitar 38–40% dari total emisi gas rumah kaca global

dan beton merupakan salah satu material dominan dengan kontribusi terbesar terhadap *embodied carbon*.

4. Kurangnya kajian yang menganalisis pengaruh optimasi dimensi elemen struktural dengan variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* pada bangunan bertingkat beton bertulang dalam konteks Indonesia, sementara penelitian internasional telah membuktikan potensi reduksi emisi karbon hingga 25–35% melalui strategi tersebut.
5. Belum adanya kerangka kerja terpadu antara perencanaan struktur beton bertulang, BIM 5D, dan analisis *embodied carbon* dalam satu alur penelitian yang sistematis dan dapat dijadikan referensi bagi industri konstruksi Indonesia.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil perencanaan struktur beton pada bangunan Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia dengan menggunakan perangkat lunak ETABS yang mengacu pada SNI 2847-2019 dan SNI 1727-2020?
2. Bagaimana proses pemodelan informasi bangunan tiga dimensi (3D) struktur Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia menggunakan perangkat lunak Autodesk Revit?
3. Bagaimana perhitungan volume pekerjaan yang terintegrasi dengan model BIM 3D menggunakan Autodesk Revit sebagai dasar penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB)?
4. Bagaimana implementasi integrasi BIM 5D yang mencakup pemodelan tiga dimensi (3D), penjadwalan (4D), dan penyusunan Rencana Anggaran Biaya (5D) pada bangunan Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia dengan memanfaatkan Autodesk Revit, Microsoft Project, dan Autodesk Navisworks?
5. Bagaimana pengaruh optimasi dimensi elemen struktur melalui variasi mutu beton terhadap nilai *embodied carbon* pada bangunan Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia?

1.4 Maksud dan Tujuan

Penelitian ini untuk mengembangkan kerangka perencanaan bangunan gedung beton bertulang yang terintegrasi antara sistem BIM 5D dengan analisis *embodied carbon* berbasis variasi mutu beton dan optimasi dimensi, sebagai kontribusi terhadap praktik konstruksi yang lebih efisien, akurat, dan berkelanjutan di Indonesia.

Adapun tujuan penelitian yang berkorelasi langsung dengan rumusan masalah di atas adalah:

1. Merencanakan struktur beton bangunan Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia menggunakan perangkat lunak *ETABS* sesuai dengan SNI 2847-2019 dan SNI 1727-2020.
2. Memodelkan informasi bangunan tiga dimensi (3D) struktur Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia menggunakan perangkat lunak *Autodesk Revit*
3. Menganalisis perhitungan volume pekerjaan yang dihasilkan dari model BIM 3D *Autodesk Revit* sebagai dasar Rencana Anggaran Biaya.
4. Mengimplementasikan integrasi BIM 5D mencakup pemodelan bangunan tiga dimensi (3D), penjadwalan konstruksi (4D) dan Rencana Anggaran Biaya (5D) menggunakan perangkat lunak *Autodesk Revit*, *Microsoft Project*, dan *Autodesk Navisworks*.
5. Menganalisis pengaruh optimasi dimensi elemen struktural dengan variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* pada bangunan Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia.

1.5 Manfaat Perencanaan

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat yang bersifat teoritis dan praktis sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah berupa kerangka kerja terpadu antara BIM 5D dengan analisis *embodied carbon* pada struktur beton bertulang, yang dapat memperkaya literatur penelitian konstruksi berkelanjutan, khususnya dalam konteks negara berkembang.

2. Menghasilkan data pengaruh optimasi dimensi struktural dengan variasi mutu beton terhadap *embodied carbon* tahapan A1–A3 siklus hidup material pada bangunan bertingkat beton bertulang di Indonesia sesuai standar BS EN 15978, sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya.
3. Memberikan panduan praktis bagi perencana struktur dalam mempertimbangkan *embodied carbon* sebagai kriteria desain sejak tahap awal perencanaan, sejalan dengan Permen PUPR No. 21 Tahun 2021 tentang Bangunan Gedung Hijau dan Strategi Nasional *Net Zero Emission* 2060.
4. Menghasilkan model BIM 5D yang dapat digunakan sebagai referensi implementasi pada proyek-proyek konstruksi serupa, sehingga mendorong adopsi teknologi digital dalam industri konstruksi Indonesia.

1.6 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian terarah, penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

1. Objek penelitian adalah Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia.
2. Data acuan perencanaan ulang terbatas pada *Detail Engineering Design* (DED) dan data uji tanah (*soil test*) yang diperoleh dari PT. ACE Engineering and Construction selaku kontraktor proyek.
3. Pemodelan struktur atas mencakup elemen kolom, balok, dan pelat beton; sedangkan struktur bawah terbatas pada pondasi tiang pancang, *tie beam*, dan *pilecap*.
4. Analisis struktur atas dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS berdasarkan SNI 2847-2019 dan SNI 1727-2020 yang hanya mengevaluasi perilaku global struktur (periode fundamental, gaya geser dasar, simpangan antar tingkat, dan distribusi gaya dalam utama); analisis struktur bawah dilakukan secara konvensional dengan bantuan *Microsoft Excel*.
5. Rencana Anggaran Biaya dan penjadwalan hanya mencakup pekerjaan struktur yang telah dimodelkan dalam *Autodesk Revit*.
6. Perangkat lunak yang digunakan terbatas pada *Autodesk Revit*, *Autodesk Navisworks*, *Microsoft Project*, *Microsoft Excel*, dan *ETABS*.

7. Variasi mutu beton yang dianalisis untuk kajian *embodied carbon* adalah mutu beton $f'_c = 25$ MPa, $f'_c = 30$ MPa, dan $f'_c = 35$ MPa, yang seluruhnya memenuhi persyaratan minimum SNI 2847-2019 untuk elemen struktur primer.
8. Analisis embodied carbon dibatasi pada Modul A1 sampai A3 (*cradle-to-gate*) menurut EN 15978:2011, yaitu penyediaan bahan baku (A1), transportasi bahan baku menuju pabrik (A2), dan manufaktur material sampai produk meninggalkan gerbang pabrik (A3). Modul A4 (transportasi ke lokasi proyek), A5 (proses konstruksi), B1–B7 (tahap penggunaan), C1–C4 (akhir masa pakai), dan D (potensi daur ulang di luar batas sistem) berada di luar cakupan penelitian.
9. Faktor emisi karbon (ECF) bersumber dari ICE Database V4.1 terbitan Circular Ecology (Oktober 2025) untuk semen, agregat, dan baja tulangan; ICE v2.0 (Hammond & Jones, 2011) untuk *fly ash* dan air; serta *Environmental Product Declaration* (EPD) produsen nomor S-P-13859 untuk tiang pancang pracetak.

1.7 Ruang Lingkup

Penelitian ini mencakup tiga aspek yaitu: Perencanaan Struktural, yakni perencanaan ulang struktur beton bertulang bangunan Unit C.3 menggunakan *ETABS* sesuai SNI 2847-2019 dan SNI 1727-2020; BIM 5D, yakni pemodelan informasi bangunan tiga dimensi, pengintegrasian dengan penjadwalan serta penggabungan dengan Rencana Anggaran Biaya; dan Keberlanjutan, yakni analisis *embodied carbon* pada elemen struktur beton bertulang berdasarkan variasi mutu, serta optimasi dimensi penampang elemen struktural.