

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada Bab IV, kesimpulan penelitian ini disusun sebagai berikut:

1. Hasil Perencanaan Struktur Beton Bertulang

Evaluasi struktur eksisting menunjukkan kinerja global telah memenuhi SNI 1726-2019 dengan partisipasi massa 99,99%, rasio simpangan antar tingkat maksimum 0,836, dan koefisien stabilitas P-delta maksimum 0,0645, namun kapasitas dan pendetailan elemen tidak memenuhi SNI 2847-2019 pada lentur balok B1 sampai B3, geser balok B1 dan B2, torsi zona tumpuan balok B1 sampai B3, spasi sengkang seluruh balok, serta pengekangan kolom dengan rasio 1,03, sehingga perencanaan ulang memiliki justifikasi teknis. Perencanaan ulang pada tiga variasi mutu beton f'_c 25, 30, dan 35 MPa dengan sistem SRPMK memenuhi seluruh persyaratan SNI, dengan rasio simpangan antar tingkat tertinggi 0,949 dan koefisien stabilitas P-delta tertinggi 0,078 yang keduanya terjadi pada f'_c 35 MPa arah Y, disertai kecukupan kapasitas dan pendetailan balok, kolom, sambungan balok-kolom, dan pelat.

Kenaikan mutu memungkinkan pengecilan dimensi secara menyeluruh, yaitu kolom K1 dari 500×600 mm menjadi 500×550 mm dan 500×500 mm, kolom K2 dari 500×500 mm menjadi 450×450 mm dan 400×400 mm, serta balok induk B1 dari 300×500 mm menjadi 300×450 mm dan 250×400 mm, sementara tebal pelat lantai dipertahankan 120 mm. Struktur bawah menggunakan tiang pancang *spun pile* Ø400 mm sepanjang 30 m yang dilengkapi *pilecap* dan *tie beam*, dengan jumlah titik tiang berkurang dari 96 pada f'_c 25 MPa menjadi 86 pada f'_c 35 MPa. Pengecilan dimensi tersebut menurunkan kekakuan lateral, sehingga koefisien stabilitas P-delta meningkat seiring kenaikan mutu dan margin terhadap batas simpangan menjadi lebih tipis pada mutu yang lebih tinggi.

2. Pemodelan Informasi Bangunan Tiga Dimensi (BIM 3D)

Model tiga dimensi struktur disusun secara terpisah untuk setiap skenario menggunakan Autodesk Revit 2026 mengikuti dimensi hasil analisis ETABS, dikerjakan bertahap dari struktur bawah menuju struktur atas. Setiap elemen memuat atribut material, dimensi penampang, dan identifikasi, dengan tulangan dimodelkan sebagai objek rebar sehingga massanya terbaca langsung dari model, sedangkan luas bekisting ditetapkan sebagai *calculated parameter* yang hanya mencakup bidang yang benar-benar membutuhkan bekisting. Penyusunan model dengan atribut selengkap ini menjadi prasyarat agar kuantitas pekerjaan dapat diekstraksi langsung dari model tanpa perhitungan terpisah.

3. Perhitungan Volume Pekerjaan Terintegrasi Model BIM 3D

Kuantitas pekerjaan diekstraksi dari model melalui delapan schedule per skenario yang menghasilkan volume beton, luas bekisting, dan massa tulangan, dirinci per elemen dan per lantai. Ekstraksi dijalankan secara terprogram melalui *Dynamo* dengan *BimorphNodes* dan *Python Script* menuju berkas .csv, kemudian diolah dengan *Power Query* menjadi tabel kuantitas penyusun rencana anggaran biaya. Alur ini bersifat semi-otomatis karena masih menuntut eksekusi ulang graf dan pemuatan ulang data setiap kali model berubah, sehingga kontribusinya terletak pada penghapusan pemindahan data manual sebagai sumber transkripsi, bukan pada otomatisasi penuh. Rencana anggaran biaya pekerjaan struktur yang dihasilkan sebesar Rp 8.734.896.533,095 untuk Skenario A, Rp 8.340.452.910,183 untuk Skenario B, dan Rp 8.146.734.904,493 untuk Skenario C.

4. Implementasi Integrasi BIM 5D

Dimensi waktu disusun dengan metode lintasan kritis pada Microsoft Project 2021 dan menghasilkan durasi total 32 minggu untuk 89 item pekerjaan, dengan kurva S rencana mencapai 100% pada minggu ke-32. Penggabungan geometri, jadwal, dan

biaya dilakukan pada Autodesk Navisworks Manage 2026 melalui modul *TimeLiner*, yaitu dengan mengaitkan *Search Set* ke tugas jadwal menggunakan *Attach Set* sehingga terbentuk BIM 4D, kemudian melengkapinya dengan kolom biaya sehingga terbentuk BIM 5D. Rantai keterhubungan berjalan dari objek Revit menuju *Search Set*, tugas *TimeLiner*, dan biaya rencana, sehingga perubahan pada model dapat ditelusuri sampai ke dimensi waktu dan biaya.

5. Optimasi Dimensi Melalui Variasi Mutu Beton Terhadap *Embodied Carbon*

Kuantifikasi *embodied carbon* pada modul A1–A3 menghasilkan EC total sebesar 690.588,011 kgCO₂e untuk Skenario A, 688.465,148 kgCO₂e untuk Skenario B, dan 635.218,747 kgCO₂e untuk Skenario C, dengan intensitas karbon berturut-turut 197,706, 197,099, dan 181,855 kgCO₂e/m². Kenaikan mutu beton tidak menurunkan karbon secara monoton, karena transisi *f*'c 25 ke 30 MPa justru menaikkan karbon beton struktur atas dengan $\Delta EC\%$ sebesar -2,667% akibat kenaikan faktor emisi yang melampaui penurunan volume, sehingga reduksi total antara kedua skenario nyaris nol yaitu 0,307%. Skenario C mencapai reduksi karbon terbesar sebesar 55.369,264 kgCO₂e atau 8,018% terhadap Skenario A sekaligus rencana anggaran biaya terendah dengan selisih 6,733%, yang terutama dicapai melalui optimasi dimensi berupa penurunan volume beton struktur atas sebesar 13,328%, penurunan massa tulangan, dan pengurangan jumlah titik tiang pancang dari 96 menjadi 86.

Mekanisme tersebut terbaca melalui Rasio Reduksi Volume dan Rasio Efisiensi Karbon–Volume, dengan REKV beton struktur atas bernilai -0,322 pada transisi A ke B yang menandakan reduksi volume terjadi tetapi karbon meningkat karena kenaikan ECF membatalkan manfaatnya, 2,783 pada transisi B ke C, dan 0,977 pada transisi A ke C, sedangkan REKV tulangan bernilai 1,000 pada seluruh transisi karena ECF baja bersifat konstan. Analisis *Carbon Cost-Effectiveness Ratio* menempatkan transisi B ke C pada peringkat pertama dengan nilai mutlak $2,749 \times 10^{-4}$ kgCO₂e per rupiah, disusul transisi A ke C dan A ke B, dan seluruh nilainya

bertanda negatif yang menunjukkan reduksi karbon tercapai bersamaan dengan penurunan biaya. Ketiga skenario memperoleh peringkat SCO₂RS yang sama yaitu kelas B, dengan Skenario C berjarak 18,145 kgCO₂e/m² dari ambang kelas A, sehingga peningkatan kelas kinerja karbon menuntut intervensi di luar variabel mutu beton, terutama reduksi kontribusi tulangan yang menyumbang hampir separuh EC total.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian, disusun saran sebagai berikut:

1. Lingkup *embodied carbon* pada penelitian ini terbatas pada modul A1–A3 (*cradle-to-gate*). Penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan ke modul B (operasional) hingga C (akhir masa pakai) untuk memperoleh gambaran karbon siklus hidup penuh, sehingga kesimpulan keunggulan skenario dapat diuji pada lingkup yang lebih luas.
2. Faktor emisi (ECF) bersumber dari basis data *Inventory of Carbon and Energy* (ICE) yang bersifat generik internasional. Penelitian lanjutan dapat menggunakan *Environmental Product Declaration* (EPD) produsen material lokal untuk memperbaiki akurasi dan keterwakilan kondisi Indonesia, serta melakukan analisis sensitivitas terhadap ketidakpastian ECF.
3. Kajian variasi material dapat diperluas ke *supplementary cementitious material* lain (*ground granulated blast-furnace slag, silica fume*) dan rentang mutu beton yang lebih lebar, guna menguji apakah reduksi karbon dapat mencapai peringkat kinerja yang lebih tinggi.
4. Kajian penurunan intensitas karbon dapat dikembangkan ke intervensi pada material tulangan, misalnya penggunaan baja dengan kandungan daur ulang tinggi atau optimasi kebutuhan tulangan.