



TUGAS AKHIR

**PERENCANAAN ULANG STRUKTUR BETON BERTULANG
BERBASIS *BIM* 5D DAN ANALISIS *EMBODIED CARBON*
TERHADAP VARIASI MUTU BETON
(Studi Kasus: Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag
Indonesia)**

Oleh:

Dimas Nur Ramadhan	40030522650041
Fransiskus Asisi Adhi Wicaksono Krisnanto	40030522650075

Diajukan sebagai

Salah satu syarat dalam menyelesaikan Sarjana Terapan
Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur
Universitas Diponegoro

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL
DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS DIPONEGORO
2026**

HALAMAN PENGESAHAN



LAPORAN TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR BETON BERTULANG BERBASIS *BIM* 5D DAN ANALISIS *EMBODIED CARBON* TERHADAP VARIASI MUTU BETON

(Studi Kasus: Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia)

Oleh:

Dimas Nur Ramadhan

40030522650041

Fransiskus Asisi Adhi Wicaksono Krisnanto

40030522650075

Laporan ini telah disusun berdasarkan masukan dari pembimbing dan dinyatakan
dapat diajukan untuk ujian tugas akhir pada tanggal 16-07-2026

Semarang, 16 Juli 2026

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II


Bambang Setiabudi S.T., M.T.

NIP. 196109021987031002


Nevy Risna Dyah Kumala S.T., M.Sc.

NIP. 199611062024062001

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur


Dr. Asri Nurdiana, S.T., M.T.
NIP. 198512092012122001

HALAMAN PENGESAHAN



LAPORAN TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR BETON BERTULANG BERBASIS BIM 5D DAN ANALISIS *EMBODIED CARBON* TERHADAP VARIASI MUTU BETON

(Studi Kasus: Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia)

Oleh:

Dimas Nur Ramadhan

40030522650041

Fransiskus Asisi Adhi Wicaksono Krisnanto

40030522650075

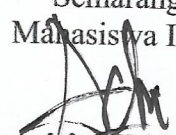
Laporan ini telah telah diperbaiki dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi saat pelaksanaan ujian tugas akhir pada tanggal 29 Juli 2026

Semarang, 29 Juli 2026

Mahasiswa I

Mahasiswa II


Dimas Nur Ramadhan
NIM. 40030522650041

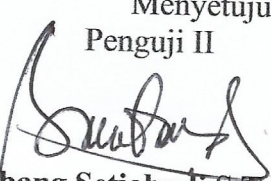

Fransiskus Asisi Adhi Wicaksono K
NIM. 40030522650075

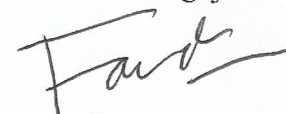
Penguji I

Menyetujui,
Penguji II

Penguji III

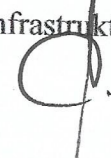

Dr. Asri Nurdiana, S.T., M.T.
NIP. 198512092012122001


Bambang Setiabudi S.T., M.T.
NIP. 196109021987031002


Fardzanela Suwanto S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198903212015042002

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur


Dr. Asri Nurdiana, S.T., M.T.
NIP. 198512092012122001

ABSTRAK

Sektor konstruksi merupakan penyumbang emisi karbon yang signifikan, sehingga *embodied carbon* perlu diperhitungkan dalam perencanaan struktur. Pada beton bertulang, pemilihan mutu memengaruhi faktor emisi material sekaligus dimensi elemen, namun pengaruh gabungannya terhadap karbon dan biaya belum banyak dikuantifikasi di Indonesia. Penelitian ini merencanakan ulang struktur Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia pada tiga variasi mutu beton (f'_c 25, 30, dan 35 MPa) bersistem SRPMK dengan integrasi BIM 5D. Analisis struktur menggunakan ETABS sesuai SNI 2847-2019, SNI 1727-2020, dan SNI 1726-2019; pemodelan, *quantity take-off*, serta integrasi biaya-waktu menggunakan Autodesk Revit, Microsoft Project, dan Navisworks. Kuantifikasi *embodied carbon* mengikuti kerangka *life cycle assessment* (ISO 14040) dengan batas sistem *cradle-to-gate* (modul A1–A3, BS EN 15978) dan faktor emisi dari basis data ICE. Ketiga skenario memenuhi persyaratan SNI. Kenaikan mutu tidak menurunkan karbon secara monoton: transisi f'_c 25 ke 30 MPa menaikkan karbon beton karena kenaikan faktor emisi melampaui penurunan volume, sedangkan f'_c 35 MPa dengan substitusi *fly ash* 102 kg/m³ menghasilkan embodied carbon terendah (635.218,747 kgCO_{2e}; 8,018% lebih rendah) sekaligus biaya struktur terendah (6,733% lebih rendah), terutama melalui optimasi dimensi. Penelitian menyarankan penempatan embodied carbon sebagai kriteria desain sejak tahap awal.

Kata Kunci: *embodied carbon*, *life cycle assessment*, BIM 5D, variasi mutu beton, optimasi dimensi, SRPMK

ABSTRACT

The construction sector is a major carbon emitter, making embodied carbon (EC) a critical consideration in structural design. In reinforced concrete, grade selection affects both the material emission factor and element dimensions, yet its combined effect on carbon and cost remains underquantified in Indonesia. This study redesigned the Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia building across three concrete grades (f_c 25, 30, and 35 MPa) using a Special Moment Resisting Frame System with 5D BIM integration. Structural analysis used ETABS per SNI 2847-2019, SNI 1727-2020, and SNI 1726-2019; modeling, quantity take-off, and schedule-cost integration used Autodesk Revit, Microsoft Project, and Navisworks. Embodied carbon quantification followed the life cycle assessment framework (ISO 14040) within a cradle-to-gate boundary (modules A1–A3, BS EN 15978), with emission factors from the ICE database. All three scenarios met code requirements. Higher grade did not monotonically reduce carbon: the f_c 25-to-30 MPa transition raised concrete carbon as the emission factor rise outweighed volume reduction, while f_c 35 MPa with 102 kg/m³ fly ash substitution yielded the lowest embodied carbon (635,218.747 kgCO_{2e}; 8.018% lower) and lowest structural cost (6.733% lower), mainly via dimensional optimization. Findings support embedding embodied carbon as a design criterion early in structural planning.

Keywords: embodied carbon, life cycle assessment, BIM 5D, concrete grade variation, dimension optimization, special moment resisting frame

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan YME, yang telah melimpahkan berkat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**Perencanaan Ulang Struktur Beton Bertulang Berbasis BIM 5D dan Analisis Embodied Carbon terhadap Variasi Mutu Beton**". Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Sarjana Terapan Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.

Penelitian ini mengintegrasikan perencanaan ulang struktur beton bertulang, estimasi biaya berbasis BIM 5D, serta analisis embodied carbon pada tiga variasi mutu beton (f'_c 25, 30, dan 35 MPa) dengan studi kasus Gedung Unit C.3 Mess TKA PT. Formosa Bag Indonesia, Kabupaten Grobogan. Proses penyusunan tugas akhir ini menuntut pemahaman lintas disiplin - mulai dari analisis struktur, manajemen biaya, hingga kajian keberlanjutan lingkungan, sehingga selesainya laporan ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak.

Dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dr. Asri Nurdiana, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, atas dukungan dan kemudahan yang diberikan selama proses studi.
2. Bapak Bambang Setiabudi S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan teknis, serta masukan yang sangat berharga dalam setiap tahap penelitian dan penulisan tugas akhir ini.
3. Nevy Risna Dyah Kumala S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa memberikan bimbingan, saran konstruktif, serta motivasi sehingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

4. Seluruh dosen, staff dan karyawan Program Studi Sarjana Terapan Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro atas ilmu, bimbingan, dan dedikasi yang diberikan kepada penulis selama menempuh studi.
5. Pihak PT. ACE Engineering and Construction yang telah memberikan izin dan kemudahan akses data teknis proyek sebagai objek studi kasus penelitian ini.
6. Orang tua dan seluruh keluarga penulis yang tiada henti memberikan dukungan moral, semangat, dan doa terbaik di setiap langkah perjalanan penulis, termasuk dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Seluruh teman-teman yang telah memberikan kebersamaan, dukungan, dan diskusi yang sangat berarti selama proses penelitian maupun penyusunan laporan ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam kelancaran penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan ke depan. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya dalam penerapan BIM 5D dan kajian keberlanjutan lingkungan pada konstruksi beton bertulang di Indonesia.

Semarang, 15 Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Rumusan Masalah	6
1.4 Maksud dan Tujuan	7
1.5 Manfaat Perencanaan.....	7
1.6 Batasan Masalah	8
1.7 Ruang Lingkup	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1 Teori Keberlanjutan dan Ekologi Industri	10
2.1.1 Teori Keberlanjutan (<i>Sustainability Theory</i>)	10
2.1.2 Ekologi Industri (<i>Industrial Ecology</i>).....	10
2.2 <i>Life Cycle Assessment</i> dan <i>Embodied carbon</i>	11
2.2.1 <i>Life Cycle Assessment (LCA)</i>	11
2.2.2 <i>Embodied carbon</i> : Definisi, Konsep, dan Signifikansi	13
2.2.3 Perhitungan <i>Embodied carbon</i> (A1-A3)	15
2.2.4 Faktor Emisi Karbon (<i>Embodied carbon Factor/ECF</i>)	17
2.2.5 Sistem Penilaian Kinerja <i>Embodied carbon</i> (SCO ₂ RS).....	29
2.2.6 Kelebihan dan Kekurangan <i>Embodied carbon</i>	30

2.3	Kebutuhan Material Penyusun Beton	31
2.4	<i>Building Information Modeling</i> (BIM).....	32
2.4.1	Klasifikasi Dimensi <i>Building Information Modeling</i> (BIM)	33
2.4.2	Kelebihan dan Kekurangan <i>Building Information Modeling</i> (BIM)	34
2.5	Perangkat Lunak BIM dan Pendukungnya.....	36
2.5.1	<i>Autodesk Revit</i>	36
2.5.2	<i>CSI ETABS</i>	36
2.5.3	<i>Microsoft Project</i>	37
2.5.4	<i>Autodesk Navisworks</i>	37
2.5.5	<i>Microsoft Excel</i>	37
2.6	Analisis Struktur Bangunan.....	38
2.6.1	Beban Mati	38
2.6.2	Beban Mati Tambahan	39
2.6.3	Beban Hidup	40
2.6.4	Beban Angin	45
2.6.5	Beban Gempa	53
2.6.6	Pengecekan Ketidakberaturan Struktur.....	68
2.6.7	Pengecekan Kinerja Struktur.....	80
2.6.8	Kombinasi Pembebanan.....	85
2.7	Perencanaan dan Penulangan Struktur Beton Bertulang	86
2.7.1	Struktur Pondasi	86
2.7.2	Struktur <i>Tie beam</i>	98
2.7.3	Struktur Balok	108
2.7.4	Struktur Kolom	120
2.7.5	Struktur Pelat Lantai	129
2.7.6	Sambungan Balok – Kolom	135
2.8	Volume Pekerjaan Struktur	139
2.9	Rencana Anggaran Biaya	139
2.10	Penjadwalan (<i>Time Schedule</i>).....	140
2.11	Penelitian Terdahulu.....	140

BAB III METODE PENELITIAN	146
3.1 Desain Penelitian	146
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	147
3.3 Lokasi dan Objek Penelitian.....	150
3.4 Variabel Penelitian	151
3.5 Hubungan Antar Variabel dan Hipotesis Penelitian.....	153
3.6 Sumber Data dan Instrumen Penelitian	154
3.5.1 Sumber Data.....	154
3.5.2 Instrumen Penelitian.....	155
3.7 Standar dan Referensi Acuan	156
3.8 Tahap Penelitian	158
3.7.1 Persiapan dan Pengumpulan Data.....	158
3.7.2 Analisis Struktur dan Optimasi Dimensi.....	159
3.7.3 Pemodelan BIM 3D dan Integrasi BIM 5D	160
3.7.4 Analisis <i>Embodied carbon</i>	160
3.9 Kriteria Keberhasilan (<i>Validity Checks</i>).....	162
3.10 Luaran Penelitian.....	168
BAB IV HASIL/PEMBAHASAN	170
4.1 Evaluasi Struktur Existing.....	170
4.1.1 Desain Geometri Model Existing.....	171
4.1.2 Kontrol Kinerja Struktur	173
4.1.3 Evaluasi Kapasitas Elemen Struktur	178
4.1.4 Justifikasi Perencanaan Ulang.....	183
4.2 <i>Preliminary Design</i>	185
4.2.1 <i>Preliminary Design</i> Balok.....	185
4.2.2 <i>Preliminary Design</i> Kolom.....	189
4.2.3 <i>Preliminary Design</i> Pelat Lantai.....	192
4.3 Pembebanan.....	197
4.3.1 Beban Mati (<i>Dead Load</i>)	197
4.3.2 Beban Hidup (<i>Live Load</i>).....	199
4.3.3 Beban Angin	200

4.3.4	Beban Gempa dan Parameter Seismik	202
4.4	Kombinasi Pembebanan	212
4.4.1	Kombinasi Metode Ultimit (LRFD)	212
4.4.2	Kombinasi Metode Tegangan Izin (ASD)	214
4.5	Analisis Struktur	217
4.5.1	Permodelan Struktur pada ETABS	217
4.5.2	Ketidakteraturan Struktur	218
4.5.3	Kontrol Kinerja Struktur	226
4.6	Perencanaan Struktur Atas	233
4.6.1	Penulangan Balok	233
4.6.2	Penulangan Kolom	260
4.6.3	Perencanaan Sambungan Balok – Kolom	276
4.6.4	Penulangan Pelat Lantai	280
4.7	Perencanaan Struktur Bawah	287
4.7.1	Perencanaan Tiang Pancang (<i>Spun Pile</i>)	287
4.7.2	Perencanaan <i>Pilecap</i>	298
4.7.3	Perencanaan <i>Tie beam</i>	309
4.8	Permodelan <i>BIM</i> 3D dan <i>Quantity Take-off</i>	317
4.8.1	Permodelan 3D	317
4.8.2	<i>Quantity Take-Off</i> (QTO)	318
4.9	Analisis <i>Embodied carbon</i>	320
4.9.1	Penentuan Nilai <i>Embodied carbon</i> Factor (ECF)	320
4.9.2	Perhitungan <i>Embodied carbon</i> per Skenario	326
4.9.3	Perhitungan Rencana Anggaran Biaya Struktur per Skenario ..	336
4.9.4	Analisis Rasio Reduksi Volume (RRV)	337
4.9.5	Analisis Reduksi <i>Embodied carbon</i> ($\Delta EC\%$)	340
4.9.6	Analisis Rasio Efisiensi Karbon – Volume (REKV)	344
4.9.7	Analisis <i>Carbon Cost-Effectiveness Ratio</i> (CCER)	347
4.9.8	Penentuan Skenario Optimal	352
4.10	<i>Building Information Modeling</i> 5D (<i>BIM</i> 5D)	354
4.10.1	Rencana Anggaran Biaya (RAB) Konstruksi	355

4.10.2 Penjadwalan Konstruksi.....	370
4.10.3 Integrasi BIM 5D	375
BAB V PENUTUP	378
5.1 Kesimpulan.....	378
5.2 Saran	381
DAFTAR PUSTAKA	382

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tahapan Siklus Hidup Bangunan Berdasarkan EN 15978	12
Gambar 2.2 Sistem Penilaian Kinerja <i>Embodied carbon</i>	30
Gambar 2.3 Peta Angin	47
Gambar 2.4 Peta Parameter Gerak Tanah S_S - Percepatan Gempa MCER Wilayah Indonesia untuk Spektrum Respons 0,2 Detik	59
Gambar 2.5 Peta Parameter Gerak Tanah S_1 - Percepatan Gempa MCER Wilayah Indonesia untuk Spektrum Respons 1 Detik	59
Gambar 2.6 Kurva Spektrum Respons Desain Seismik.....	62
 Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Bagian 1)	148
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Bagian 2)	149
 Gambar 4.1 Denah Kolom Struktur Existing.....	171
Gambar 4.2 Denah Balok Struktur Existing	171
Gambar 4.3 Spektrum Respon Desain	203
Gambar 4.4 Permodelan Struktur pada ETABS	218
Gambar 4.5 Detail Penulangan Balok f'_c 25 MPa.....	257
Gambar 4.6 Detail Penulangan Balok f'_c 30 MPa.....	258
Gambar 4.7 Detail Penulangan Balok f'_c 35 MPa.....	259
Gambar 4.8 Diagram Interaksi Biaksial Tiga Dimensi Kolom K1 f'_c 25 MPa..	263
Gambar 4.9 Diagram Interaksi Biaksial M_x – M_y pada $P = 0$ kN.....	264
Gambar 4.10 Diagram Interaksi P – M pada Sudut Resultan 57°	264
Gambar 4.11 Diagram Interaksi P – M , Penampang Setengah ($M = 0$ s.d. 700 kN·m)	265
Gambar 4.12 Detail Penulangan Kolom f'_c 25 MPa	273
Gambar 4.13 Detail Penulangan Kolom f'_c 30 MPa	274
Gambar 4.14 Detail Penulangan Kolom f'_c 35 MPa	275
Gambar 4.15 Detail Penulangan Pelat S2 ($t = 100$ mm).....	286

Gambar 4.16 Detail Penulangan Pelat S1 ($t = 120 \text{ mm}$).....	286
Gambar 4.17 Titik Pondasi	291
Gambar 4.18 Detail Penulangan Pilecap PC1 (1 Tiang).....	305
Gambar 4.19 Detail Penulangan Pilecap PC2 (2 Tiang).....	305
Gambar 4.20 Detail Penulangan Pilecap PC3 (3 Tiang).....	306
Gambar 4.21 Detail Penulangan Pilecap PC4 (4 Tiang).....	307
Gambar 4.22 Detail Penulangan Pilecap PC6 (6 Tiang).....	308
Gambar 4.23 Detail Penulangan Tie beam TB1	316
Gambar 4.24 Permodelan 3D Struktur.....	317
Gambar 4.25 <i>Quantity Take-Off</i> Kolom	318
Gambar 4.26 <i>Quantity Take-Off</i> Balok	319
Gambar 4.27 <i>Quantity Take-Off</i> Pelat.....	319
Gambar 4.28 Komposisi Material Beton	321
Gambar 4.29 Nilai ECF Beton	324
Gambar 4.30 Komposisi ECF Beton.....	324
Gambar 4.31 Proporsi EC Per Elemen Struktural.....	329
Gambar 4.32 EC Total	330
Gambar 4.33 Profil EC per Lantai	331
Gambar 4.34 Proporsi EC per Skenario	333
Gambar 4.35 Peringkat SCO ₂ RS per Skenario	335
Gambar 4.36 RAB Pekerjaan Struktur per Skenario	336
Gambar 4.37 Rasio Reduksi Volume Struktur Atas	339
Gambar 4.38 Rasio Reduksi Volume Struktur Bawah	340
Gambar 4.39 Reduksi <i>Embodied carbon</i> ($\Delta EC\%$) Struktur Atas	342
Gambar 4.40 Reduksi <i>Embodied carbon</i> ($\Delta EC\%$) Struktur Bawah	342
Gambar 4.41 Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV) Struktur Atas	345
Gambar 4.42 Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV) Struktur Bawah	346
Gambar 4.43 <i>Carbon Cost Efficiency Ratio</i>	349
Gambar 4.44 Diagram Alir Integrasi Data Model BIM ke RAB.....	355
Gambar 4.45 Algoritma <i>Dynamo</i> untuk Ekstraksi Kuantitas.....	358
Gambar 4.46 Node <i>Python Script</i> untuk <i>Data Cleansing</i> Keluaran <i>Schedule</i>	359

Gambar 4.47 Hasil Pemuatan Data CSV ke <i>Excel</i> melalui <i>Power Query</i>	360
Gambar 4.48 Kurva S Rencana Pelaksanaan Konstruksi Skenario C (f'_c 35 MPa)	372
Gambar 4.49 Diagram batang (<i>Gantt chart</i>).....	374
Gambar 4.50 Model Federasi Struktur Skenario C pada Autodesk Navisworks	375
Gambar 4.51 Struktur Tugas Hasil Impor Jadwal pada Modul TimeLiner	376
Gambar 4.52 Simulasi BIM 5D	377

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tahapan Siklus Hidup Bangunan.....	12
Tabel 2.2 Modul di Luar Cakupan Penelitian dan Variabel Penentunya	16
Tabel 2.3 Cakupan Proses Modul A1–A3 untuk Material yang Digunakan.....	18
Tabel 2.4 Perbandingan Basis Data Faktor Emisi.....	20
Tabel 2.5 Perbandingan Nilai Faktor Emisi antara ICE v2.0 dan ICE V4.1	24
Tabel 2.6 Nilai <i>Embodied carbon Factor</i> (ECF) Material Penyusun Beton	26
Tabel 2.7 Nilai <i>Embodied carbon Factor</i> (ECF) Baja Tulangan.....	27
Tabel 2.8 Nilai <i>Embodied carbon</i> PC Spun Pile.....	28
Tabel 2.9 Kebutuhan Material Penyusun Beton per m ³ untuk f ^c 25, 30, 35 MPa	32
Tabel 2.10 Klasifikasi Dimensi <i>Building Information Modeling</i> (BIM)	33
Tabel 2.11 Berat Jenis Bahan Bangunan.....	38
Tabel 2.12 Berat Komponen Gedung (Beban Mati Tambahan)	39
Tabel 2.13 Beban Hidup Minimum Lantai Berdasarkan Fungsi Ruang.....	40
Tabel 2.14 Koefisien Reduksi Beban Hidup.....	42
Tabel 2.15 Beban Hidup Merata, Terpusat, dan Ketentuan Reduksi.....	43
Tabel 2.16 Periode Ulang Kecepatan Angin Dasar	46
Tabel 2.17 Kecepatan Angin Dasar, V (m/s) Wilayah Asia-Pasifik.....	48
Tabel 2.18 Faktor Arah Angin (Kd) Berdasarkan Tipe Struktur	48
Tabel 2.19 Kategori Kekasaran Permukaan Tanah.....	49
Tabel 2.20 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (Ke)	50
Tabel 2.21 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan (Kz)	51
Tabel 2.22 Koefisien Tekanan Internal (GCpi).....	52
Tabel 2.23 Koefisien Tekanan Eksternal Dinding (Cp).....	53
Tabel 2.24 Klasifikasi Kelas Situs Tanah	54
Tabel 2.25 Kategori Risiko Bangunan Berdasarkan Jenis Pemanfaatan	55
Tabel 2.26 Faktor Keutamaan Gempa (Ie).....	58
Tabel 2.27 Faktor Amplifikasi Situs (Fa) Berdasarkan Kelas Situs dan Ss.....	60
Tabel 2.28 Faktor Amplifikasi Situs (Fv) Berdasarkan Kelas Situs dan S1	60

Tabel 2.29 Kategori Desain Seismik (KDS) Berdasarkan Nilai S_{DS}	63
Tabel 2.30 Kategori Desain Seismik (KDS) Berdasarkan Nilai S_{D1}	63
Tabel 2.31 Sistem Rangka Pemikul Momen Berdasarkan Kategori Desain Seismik	64
Tabel 2.32 Sistem Pemikul Gaya Seismik - Sistem Rangka Pemikul Momen.....	64
Tabel 2.33 Koefisien Batas Atas Periode (C_u)	67
Tabel 2.34 Koefisien C_t dan Eksponen x Berdasarkan Tipe Struktur	67
Tabel 2.35 Klasifikasi, Kriteria, dan Berlakunya Ketidakberaturan Horizontal...	72
Tabel 2.36 Klasifikasi, Kriteria, dan Berlakunya Ketidakberaturan Vertikal.....	76
Tabel 2.37 Ketentuan Penetapan Faktor Redundansi ρ	77
Tabel 2.38 Konsekuensi Prosedural Ketidakberaturan pada KDS D.....	78
Tabel 2.39 Alur Prosedur Pengecekan Ketidakberaturan Struktur	79
Tabel 2.40 Kombinasi Beban Untuk Metode Ultimit	85
Tabel 2.41 Kombinasi Beban Untuk Metode Tegangan Izin.....	85
Tabel 2.42 Faktor Keamanan Daya Dukung Tiang per Kombinasi ASD.....	89
Tabel 2.43 Klasifikasi Tiang Berdasarkan Panjang dan Faktor Kekakuan λ	90
Tabel 2.44 Kuat Geser Beton <i>Pile cap</i> - Geser Satu Arah	94
Tabel 2.45 Tegangan Geser Dua Arah <i>Pile cap</i>	94
Tabel 2.46 Luas Tulangan Minimum ($A_s, \min$) <i>Pile cap</i>	96
Tabel 2.47 Koefisien Distribusi Tegangan Beton β_1	97
Tabel 2.48 Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ) - Elemen Lentur.....	97
Tabel 2.49 Koefisien Distribusi Tegangan Beton β_1	99
Tabel 2.50 Klasifikasi Desain <i>Tie beam</i> Berdasarkan Gaya Aksial.....	100
Tabel 2.51 Beban Dinding	102
Tabel 2.52 Faktor Reduksi Kekuatan ϕ untuk Lentur berdasarkan Regangan Tarik	106
Tabel 2.53 Spasi Maksimum Tulangan Transversal <i>Tie beam</i>	108
Tabel 2.54 Tinggi Minimum Balok Nonprategang.....	109
Tabel 2.55 Faktor Reduksi ϕ Lentur Berdasarkan Zona Regangan	112
Tabel 2.56 Spasi Maksimum Tulangan Transversal Balok SRPMK.....	114
Tabel 2.57 Spasi Maksimum Senggang Daerah Sendi Plastis Kolom SRPMK .	127

Tabel 2.58 Ketebalan Minimum Pelat Satu Arah Nonprategang.....	129
Tabel 2.59 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah Nonprategang Tanpa Balok Interior.....	129
Tabel 2.60 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah dengan Balok di Semua Sisi..	130
Tabel 2.61 Output Gaya Dalam Pelat dari ETABS dan Penggunaannya	132
Tabel 2.62 Kuat Geser Nominal Sambungan Balok-Kolom.....	138
Tabel 2.63 Penelitian Terdahulu	140
Tabel 3.1 Skenario Variasi Mutu Beton pada Elemen Struktural.....	147
Tabel 3.2 Data Teknis Objek Penelitian	151
Tabel 3.3 Variabel Penelitian.....	151
Tabel 3.4 Instrumen Perangkat Lunak Penelitian	155
Tabel 3.5 Standar dan Referensi Acuan Penelitian.....	156
Tabel 3.6 Indikator Penelitian	162
Tabel 4.1 Konfigurasi Tulangan Elemen Struktur Eksisting	172
Tabel 4.2 Ragam Getar dan Partisipasi Massa Kumulatif Struktur Eksisting	174
Tabel 4.3 Kontrol Simpangan Antar Tingkat Struktur Eksisting.....	176
Tabel 4.4 Kontrol P-Delta Struktur Eksisting.....	177
Tabel 4.5 Evaluasi Kapasitas Lentur Tumpuan Negatif	178
Tabel 4.6 Evaluasi Kapasitas Geser Per Zona	180
Tabel 4.7 Evaluasi Interaksi Torsi	181
Tabel 4.8 Evaluasi Luas Pengekangan Kolom.....	182
Tabel 4.9 Evaluasi Kuat Geser Joint.....	182
Tabel 4.10 Rekapitulasi Kinerja Global Struktur Eksisting.....	183
Tabel 4.11 Rekapitulasi Kapasitas dan Pendetailan Elemen	183
Tabel 4.12 Rekapitulasi <i>Preliminary Design</i> Balok	188
Tabel 4.13 Rekapitulasi <i>Preliminary Design</i> Kolom.....	191
Tabel 4.14 Momen Inersia dan Rasio Kekakuan Balok-T Penumpu Pelat S1....	195
Tabel 4.15 Rekapitulasi <i>Preliminary Design</i> Pelat Lantai.....	197
Tabel 4.16 Beban Mati Tambahan Pelat Lantai.....	198
Tabel 4.17 Beban Mati Tambahan Pelat Atap	199
Tabel 4.18 Beban Hidup	200

Tabel 4.19 Parameter SPGAU	201
Tabel 4.20 Parameter Dasar Seismik	204
Tabel 4.21 Distribusi Massa Bangunan	208
Tabel 4.22 Gaya Geser Dasar Statik	209
Tabel 4.23 Parameter Seismik Perencanaan	210
Tabel 4.24 Perbandingan Gaya Gempa.....	211
Tabel 4.25 Kombinasi Pembebanan Metode Ultimit (LRFD)	212
Tabel 4.26 Kombinasi Pembebanan Tegangan Izin (ASD)	214
Tabel 4.27 Rasio Simpangan.....	219
Tabel 4.28 Gaya Diafragma	220
Tabel 4.29 Kekakuan Tingkat Lunak.....	222
Tabel 4.30 Perbandingan Massa Antar Tingkat.....	223
Tabel 4.31 Kuat Lateral Antar Tingkat	224
Tabel 4.32 Rekapitulasi Peninjauan Ketidakberaturan Struktur	225
Tabel 4.33 Nilai Simpangan Arah X.....	228
Tabel 4.34 Nilai Simpangan Arah Y	228
Tabel 4.35 Kontrol P-Delta Arah X	230
Tabel 4.36 Kontrol P-Delta Arah Y	230
Tabel 4.37 Rekapitulasi Kontrol Kinerja Struktur	231
Tabel 4.38 Rekapitulasi Penulangan Lentur Balok.....	239
Tabel 4.39 Rekapitulasi Penulangan Geser Balok	245
Tabel 4.40 Rekapitulasi Penulangan Geser Torsi Balok.....	251
Tabel 4.41 Rekapitulasi Penulangan Lentur Torsi Balok	254
Tabel 4.42 Rekapitulasi Gaya Dalam Aksial-Lentur Kolom K1	262
Tabel 4.43 Beban Terfaktor terhadap Momen Kapasitas Kolom K1 f'_c 25 MPa.....	266
Tabel 4.44 Rekapitulasi Penulangan Lentur Kolom	271
Tabel 4.45 Rekapitulasi Penulangan Geser Kolom	272
Tabel 4.46 Rekapitulasi Perencanaan Sambungan Balok–Kolom.....	279
Tabel 4.47 Rekapitulasi Penulangan Lentur Pelat	285
Tabel 4.48 Kebutuhan Tiang Pancang	292
Tabel 4.49 Rekapitulasi Penulangan Lentur <i>Pile cap</i>	303

Tabel 4.50 Rekapitulasi Penulangan Lentur <i>Tie beam</i>	315
Tabel 4.51 Rekapitulasi Penulangan Geser <i>Tie beam</i>	315
Tabel 4.52 Nilai ECF Material.....	320
Tabel 4.53 Komposisi Massa Material Beton per m ³	321
Tabel 4.54 Kalkulasi ECF Beton per Skenario	323
Tabel 4.55 Rekapitulasi QTO Struktur Atas per Skenario.....	327
Tabel 4.56 Rekapitulasi QTO Struktur Bawah per Skenario	328
Tabel 4.57 Rekapitulasi EC per Elemen Struktural (kgCO _{2e})	328
Tabel 4.58 Rekapitulasi EC per Lingkup Struktur (kgCO _{2e}).....	329
Tabel 4.59 Distribusi EC per Lantai - Struktur Atas (kgCO _{2e})	330
Tabel 4.60 Proporsi EC menurut Komponen Material (kgCO _{2e})	332
Tabel 4.61 Nilai ECI dan Peringkat SCO ₂ RS per Skenario	334
Tabel 4.62 Rekapitulasi RAB Pekerjaan Struktur per Skenario	336
Tabel 4.63 Rasio Reduksi Volume (RRV) per Material dan Lingkup Struktur (%)	338
Tabel 4.64 Reduksi <i>Embodied carbon</i> ($\Delta EC\%$)	341
Tabel 4.65 Rasio Efisiensi Karbon–Volume (REKV)	345
Tabel 4.66 Gate Karbon per Pasangan Skenario.....	348
Tabel 4.67 Hasil Perhitungan CCER per Pasangan Skenario	349
Tabel 4.68 Peringkat Efisiensi Karbon–Biaya Berdasarkan CCER.....	351
Tabel 4.69 Hasil Evaluasi Tingkat 1 - Kepatuhan SNI.....	352
Tabel 4.70 Rekapitulasi Indikator Penentuan Skenario Optimal	353
Tabel 4.71 <i>Schedule/Quantities Revit</i>	356
Tabel 4.72 Pemetaan Kolom Berkas CSV Hasil Ekstraksi	361
Tabel 4.73 Rencana Anggaran Biaya Konstruksi Lengkap (f'c 35 MPa).....	362
Tabel 4.74 Rekapitulasi RAB (f'c 35 MPa).....	370
Tabel 4.75 Rekapitulasi Bobot Pekerjaan Skenario C (f'c 35 MPa).....	373

DAFTAR LAMPIRAN

1. *Detailed Engineering Design* Struktur Existing
2. Data Hasil Uji Tanah Lokasi Proyek
3. Perhitungan Evaluasi Struktur Existing
4. Hasil Analisis Gaya Dalam ETABS
5. Perhitungan Struktur
6. *Detailed Engineering Design* Struktur *Redesign*
7. Rencana Anggaran Biaya Struktur per Skenario
8. Analisa Harga Satuan Pekerjaan
9. Harga Satuan Upah, Bahan, dan Alat
10. Analisis *Embodied Carbon*
11. Rencana Anggaran Biaya Konstruksi (final)
12. Kurva S
13. *Gantt Chart*
14. *Network Planning*
15. *Script Export Revit to CSV*