

EVALUASI KINERJA GEDUNG TINGGI MODIFIKASI SISTEM *OUTRIGGER TRUSS* BAJA MENGUNAKAN ANALISIS RIWAYAT WAKTU

Chris Tirtaatmaja Lekalette
NRP: 1521040

Pembimbing: Dr. Yosafat Aji Pranata, S.T., M.T.

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara yang terletak di jalur *ring of fire* kawasan pasifik dan menjadi pusat pertemuan beberapa lempeng bumi. Pada daerah tersebut memiliki risiko gempa bumi yang perlu dipertimbangkan dalam prosedur desain bangunan tahan gempa. Untuk mendekati hasil kinerja respon struktur sebenarnya yang dikenakan beban gempa perlu menggunakan prosedur analisis dinamis riwayat waktu. Bangunan bertingkat tinggi memerlukan sistem struktur penahan gempa salah satunya adalah *outrigger truss* yang biasanya efektif digunakan untuk menahan beban lateral. Evaluasi bangunan tinggi menjadi pertimbangan utama agar *engineer* dapat memperkirakan kinerja bangunan yang diakibatkan oleh gempa.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja bangunan tinggi dengan sistem *outrigger truss* baja menggunakan analisis riwayat waktu yang ditinjau berdasarkan *displacement, drift, base shear*, dan elemen *hinge*. Ruang lingkup yang dibahas meliputi gedung eksisting dan gedung modifikasi *outrigger truss* 48 lantai yang berlokasi di Jakarta, analisis yang digunakan adalah analisis dinamik riwayat waktu, material *nonlinear* yang diasumsikan adalah *hinge* pada elemen balok, kolom, dinding geser, dan *outrigger truss*.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa tinjauan *drift* berdasarkan ATC 40 untuk model eksisting dan model *outrigger truss* yang diberikan beban *ground motion* San Fernando, Imperial Valley, dan Chi-Chi masih dalam *index immediate occupancy*. Untuk tinjauan *hinge* pada elemen struktur model eksisting yang diberikan beban *ground motion* San Fernando arah X dan Y, Imperial Valley arah X, dan Chi-Chi arah X masih dalam kondisi elastis dengan *index A to B* yang termasuk ke dalam kategori *immediate occupancy*, sedangkan untuk *ground motion* Imperial Valley arah Y, dan Chi-Chi arah Y menyatakan kategori *immediate occupancy to life safety*. Untuk tinjauan *hinge* pada elemen struktur model modifikasi *outrigger truss* yang diberikan *ground motion* San Fernando, Imperial Valley, dan Chi-Chi arah X dan Y masih dalam kondisi elastis dengan *index A to B* yang termasuk ke dalam kategori *immediate occupancy*. Pemasangan *outrigger truss* memiliki pengaruh pada pengurangan *drift*, penambahan kekuatan, dan kekakuan dinilai dengan *index immediate occupancy*. Selain itu penggunaan *outrigger truss* mengurangi volume material beton pada elemen kolom dan dinding geser sebesar 6,325% tanpa mengurangi tingkat kekakuan bangunan.

Kata Kunci: bangunan bertingkat tinggi, beton, *outrigger*, riwayat waktu, kinerja

PERFORMANCE EVALUATION HIGH RISE BUILDING MODIFICATION OF STEEL OUTRIGGER TRUSS SYSTEM USING TIME HISTORY ANALYSIS

Chris Tirtaatmaja Lekalette
NRP: 1521040

Supervisor: Dr. Yosafat Aji Pranata, S.T., M.T.

ABSTRACT

Indonesia is a country located on the ring of fire in the Pacific region and is the center of a meeting of several earth plates. In these areas there is an earthquake risk that needs to be considered in earthquake resistant building design procedures. To approach the results of response performance, the actual structure that is subject to seismic load needs to use a dynamic time analysis procedure. High-rise buildings require an earthquake-resistant structural system, one of which is an outrigger truss that is usually effectively used to withstand lateral loads. High building evaluation is the main consideration so that engineers can estimate the building performance caused by the earthquake.

This study aims to evaluate the performance of tall buildings with a steel truss outrigger system using time history analysis that is reviewed based on displacement, drift, base shear, and hinge elements. The scope covered includes the existing building and the 48-floor outrigger truss modification building located in Jakarta, the analysis used is a dynamic analysis of time history, nonlinear material assumed to be hinge on beam elements, columns, shear walls, and outrigger truss. The results of this study show that drift reviews based on ATC 40 for existing models and outrigger truss models are given San Fernando, Imperial Valley, and Chi-Chi ground motion loads still in the immediate occupancy index. For a hinge review of the structural elements of the existing model given San Fernando ground motion loads in X and Y direction, Imperial Valley X direction, and Chi-Chi X direction are still in elastic condition with index A to B which is included in the immediate occupancy category, while for ground Imperial Valley's direction of Y, and Chi-Chi direction Y states the immediate occupancy to life safety category. For a hinge review of the modified outrigger truss model structural elements given San Fernando, Imperial Valley, and Chi-Chi directions X and Y ground motion is still in elastic condition with index A to B which is included in the immediate occupancy category. Installation of outrigger truss has an influence on reducing drift, strength, and stiffness assessed by the immediate occupancy index. In addition, the use of outrigger truss reduces the volume of column concrete material and shear walls by 6,325% without reducing the level of rigidity of the building.

Keywords: high-rise buildings, concrete, outriggers, time history, performance

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------|
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| PERNYATAAN ORISINALITAS LAPORAN PENELITIAN | ii |
| PERNYATAAN PUBLIKASI LAPORAN PENELITIAN | iii |
| SURAT KETERANGAN TUGAS AKHIR | iv |
| SURAT KETERANGAN SELESAI TUGAS AKHIR | v |
| KATA PENGANTAR | vi |
| ABSTRAK | viii |
| <i>ABSTRACT</i> | ix |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xvi |
| DAFTAR NOTASI | xviii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xx |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.3 Ruang Lingkup Penelitian | 3 |
| 1.4 Sistematika Penulisan | 4 |
| BAB II STUDI LITERATUR | 5 |
| 2.1 Bangunan Tinggi | 5 |
| 2.2 Sistem <i>Outrigger Truss</i> | 6 |
| 2.3 Pembebanan | 9 |
| 2.3.1 Gravitasi | 10 |
| 2.3.2 Gempa | 11 |
| 2.4 Pengecekan Struktur | 19 |
| 2.4.1 Penentuan Simpangan Antar Lantai | 19 |
| 2.4.2 Analisis $0,85V_s < V_d$ | 19 |
| 2.4.3 Pengaruh P-delta | 20 |
| 2.5 Kapasitas Elemen Struktur | 20 |
| 2.6 Evaluasi Kinerja Gedung | 21 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 22 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian | 22 |
| 3.2 Data Umum Struktur | 23 |
| 3.2.1 Data Gedung | 30 |
| 3.2.2 Data Material | 31 |
| 3.2.3 Komponen Struktur | 31 |
| 3.3 Pembebanan | 35 |
| 3.3.1 Pembebanan Gravitasi | 35 |
| 3.3.2 Pembebanan Gempa | 36 |
| 3.4 Kombinasi Pembebanan | 42 |
| 3.5 Pengecekan Analisis Dua Tahap | 43 |
| 3.6 Pemodelan Struktur | 45 |
| BAB IV ANALISIS DATA | 61 |
| 4.1 Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan Model Eksisting | 61 |
| 4.1.1 Rasio Partisipasi Modal Massa | 61 |

| | | |
|----------------------------|--|-----|
| 4.1.2 | Prosedur Gaya Lateral Ekuivalen | 62 |
| 4.1.3 | Perhitungan Faktor Skala Gaya Gempa | 63 |
| 4.1.4 | Pengecekan Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) | 65 |
| 4.1.5 | Pengecekan P-Delta | 70 |
| 4.1.6 | Pengecekan Kontribusi <i>Frame</i> Minimal 25% Gaya Lateral | 75 |
| 4.2 | Hasil Desain Penulangan ETABS Model Eksisting | 75 |
| 4.2.1 | Desain Penulangan Elemen Balok | 76 |
| 4.2.2 | Desain Penulangan Elemen Kolom | 84 |
| 4.2.3 | Desain Penulangan Hubungan Balok Kolom | 87 |
| 4.2.4 | Desain Penulangan Dinding Geser | 88 |
| 4.3 | Pengecekan Perilaku Struktur Bangunan Model <i>Outrigger Truss</i> | 91 |
| 4.3.1 | Rasio Partisipasi Modal Massa | 91 |
| 4.3.2 | Prosedur Gaya Lateral Ekuivalen | 93 |
| 4.3.3 | Perhitungan Faktor Skala Gaya Gempa | 94 |
| 4.3.4 | Pengecekan Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) | 95 |
| 4.3.5 | Pengecekan P-Delta | 100 |
| 4.3.6 | Pengecekan Kontribusi <i>Frame</i> Memikul 25% Gaya Lateral | 105 |
| 4.4 | Hasil Desain Penulangan ETABS Model <i>Outrigger Truss</i> | 106 |
| 4.4.1 | Desain Penulangan Elemen Balok | 106 |
| 4.4.2 | Desain Penulangan Elemen Kolom | 115 |
| 4.4.3 | Desain Penulangan Hubungan Balok Kolom | 118 |
| 4.4.4 | Desain <i>Outrigger Truss</i> | 119 |
| 4.4.5 | Desain Penulangan Dinding Geser | 122 |
| 4.5 | Analisis Dinamik Nonlinear | 124 |
| 4.5.1 | <i>Matching Spectra Acceleration</i> | 124 |
| 4.5.2 | Pemodelan <i>Hinge</i> | 135 |
| 4.5.3 | Pemodelan Beban ETABS | 141 |
| 4.6 | Evaluasi Kinerja Struktur | 144 |
| 4.6.1 | Pengecekan <i>Base Shear</i> | 145 |
| 4.6.2 | Pengecekan <i>Displacement</i> | 146 |
| 4.6.3 | Pengecekan <i>Drift</i> | 148 |
| 4.6.4 | Pengecekan <i>Hinge</i> | 150 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 158 |
| 5.1 | Kesimpulan | 158 |
| 5.2 | Saran | 159 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 160 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Peta Wilayah <i>Ring of Fire</i> | 1 |
| Gambar 1.2 Struktur Bangunan Shanghai <i>World Financial Center</i> | 2 |
| Gambar 1.3 Gedung Soho Pancoran Jakarta | 3 |
| Gambar 2.1 Sistem Struktur Penahan Lateral Efektif | 5 |
| Gambar 2.2 Bagian Sistem <i>Outrigger Truss</i> | 6 |
| Gambar 2.3 Pemasangan <i>Outrigger Truss</i> | 7 |
| Gambar 2.4 Contoh Pemasangan <i>Outrigger Truss</i> | 8 |
| Gambar 2.5 Distribusi Gaya Pada <i>Outrigger Truss</i> | 8 |
| Gambar 2.6 S_s , Gempa Maksimum (MCE_R), Kelas Situs SB | 11 |
| Gambar 2.7 S_I , Gempa Maksimum (MCE_G), Kelas Situs SB | 11 |
| Gambar 2.8 Kurva Karakteristik Material <i>Nonlinear</i> | 21 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian | 22 |
| Gambar 3.2 Denah Struktur Basement 1-Basement 2 | 24 |
| Gambar 3.3 Denah Struktur Lt. 1-Lt. 2 | 24 |
| Gambar 3.4 Denah Struktur Lt. 3 | 25 |
| Gambar 3.5 Denah Struktur Lt. 4 | 25 |
| Gambar 3.6 Denah Struktur Lt. 5-Lt. 8 | 26 |
| Gambar 3.7 Denah Struktur Lt. 9 | 26 |
| Gambar 3.8 Denah Struktur Lt. 10 | 27 |
| Gambar 3.9 Denah Struktur Lt. 11 | 27 |
| Gambar 3.10 Denah Struktur <i>Mezzanine</i> | 28 |
| Gambar 3.11 Denah Struktur Lt. 12-Lt. 48 | 28 |
| Gambar 3.12 Denah Struktur <i>Skybridge</i> | 29 |
| Gambar 3.13 Denah <i>Outrigger Truss</i> | 29 |
| Gambar 3.14 Struktur Gedung Penelitian | 34 |
| Gambar 3.15 Respon Spektrum Kota Jakarta | 40 |
| Gambar 3.16 <i>Ground Motion</i> Chi-Chi, Taiwan | 40 |
| Gambar 3.17 <i>Ground Motion</i> Imperial Valley, California | 41 |
| Gambar 3.18 <i>Ground Motion</i> San Fernando, California | 41 |
| Gambar 3.19 Bagian Struktur Gedung | 43 |
| Gambar 3.20 Model Struktur A Lantai BS1 | 44 |
| Gambar 3.21 Model Struktur B Lantai R1 | 44 |
| Gambar 3.22 Model Struktur C Lantai FS11 | 45 |
| Gambar 3.23 Model Struktur D Lantai ME10 | 45 |
| Gambar 3.24 Pemilihan Satuan ETABS | 46 |
| Gambar 3.25 Tampilan <i>Input Grid X dan Y</i> | 46 |
| Gambar 3.26 Tampilan <i>Input Story Data</i> | 47 |
| Gambar 3.27 Tampilan <i>Define > Material Properties</i> | 47 |
| Gambar 3.28 Tampilan <i>Input Material Properties</i> untuk f'_c 33MPa | 48 |
| Gambar 3.29 Tampilan <i>Material Properties</i> untuk Data f'_c Lainnya | 48 |
| Gambar 3.30 Tampilan <i>Define > Section Properties > Frame Sections</i> | 49 |
| Gambar 3.31 Tampilan Data Balok | 49 |
| Gambar 3.32 Tampilan Data Kolom | 49 |
| Gambar 3.33 Tampilan <i>Section Properties</i> Lainnya | 50 |
| Gambar 3.34 Tampilan <i>Define > Section Properties > Slab Sections</i> | 50 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 3.35 Tampilan Data Pelat | 50 |
| Gambar 3.36 Tampilan <i>Define > Section Properties > Wall Sections</i> | 51 |
| Gambar 3.37 Tampilan Data Dinding Geser | 51 |
| Gambar 3.38 Tampilan <i>Load Patterns</i> | 52 |
| Gambar 3.39 Tampilan <i>Mass Source Data</i> | 52 |
| Gambar 3.40 Tampilan <i>Quick Draw Columns</i> dan <i>Input Properties</i> Kolom | 53 |
| Gambar 3.41 Tampilan Penentuan Kolom pada <i>Joint</i> yang Dipilih | 53 |
| Gambar 3.42 Tampilan Kolom Tampak 3D | 53 |
| Gambar 3.43 Tampilan <i>Draw Beams</i> dan <i>Input Properties</i> Balok | 54 |
| Gambar 3.44 Tampilan Penggambaran Balok dari Tiap <i>Joint</i> ke <i>Joint</i> | 54 |
| Gambar 3.45 Tampilan Kolom dan Balok Tampak 3D | 54 |
| Gambar 3.46 Tampilan <i>Draw Floor/Wall</i> dan <i>Input Properties</i> Pelat | 55 |
| Gambar 3.47 Tampilan Penggambaran Pelat Tampak Atas | 55 |
| Gambar 3.48 Tampilan Kolom, Balok, dan Pelat Tampak 3D | 55 |
| Gambar 3.49 Tampilan <i>Draw Floor/Wall</i> dan <i>Input Properties</i> Dinding Geser | 56 |
| Gambar 3.50 Tampilan Penggambaran Dinding Geser Tampak Samping | 56 |
| Gambar 3.51 Tampilan <i>Assign > Shell Loads > Uniforms</i> | 56 |
| Gambar 3.52 Tampilan Beban Mati Tambahan (SDL) pada Pelat | 57 |
| Gambar 3.53 Tampilan Beban Hidup (LL) pada Pelat | 57 |
| Gambar 3.54 Tampilan <i>Assign > Frame Loads > Distributed</i> | 57 |
| Gambar 3.55 Input Beban Mati pada Balok | 58 |
| Gambar 3.56 Tampilan Beban Dinding pada Balok Tampak 3D | 58 |
| Gambar 3.57 Tampilan <i>Define > Functions > Response Spectrum</i> | 58 |
| Gambar 3.58 <i>Input Data Respons Spektrum</i> dan Kurva Respons Spektrum | 59 |
| Gambar 3.59 Tampilan Pembuatan <i>Response Spectrum Cases</i> | 59 |
| Gambar 3.60 Tampilan <i>Input Load Case Data</i> Arah X dan Y | 59 |
| Gambar 3.61 Tampilan Input Kombinasi Pembebanan | 60 |
| Gambar 3.62 <i>Run Analysis</i> | 60 |
| Gambar 4.1 Diagram Geser Arah X | 64 |
| Gambar 4.2 Diagram Geser Arah Y | 65 |
| Gambar 4.3 Simpangan Antar Tingkat Arah X | 69 |
| Gambar 4.4 Simpangan Antar Tingkat Arah Y | 70 |
| Gambar 4.5 P-Delta Arah X | 74 |
| Gambar 4.6 P-Delta Arah Y | 74 |
| Gambar 4.7 Denah Balok Desain Lantai ME29 | 76 |
| Gambar 4.8 Denah Desain Kolom Lantai L22 | 85 |
| Gambar 4.9 Diagram Interaksi Kolom | 86 |
| Gambar 4.10 Denah Hubungan Balok Kolom Desain Lantai L22 | 87 |
| Gambar 4.11 Denah Dinding Geser Desain Lantai L22 | 89 |
| Gambar 4.12 Desain Model Eksisting ETABS | 91 |
| Gambar 4.13 Diagram Geser Arah X | 95 |
| Gambar 4.14 Diagram Geser Arah Y | 95 |
| Gambar 4.15 Simpangan Antar Tingkat Arah X | 100 |
| Gambar 4.16 Simpangan Antar Tingkat Arah Y | 100 |
| Gambar 4.17 P-Delta Arah X | 104 |
| Gambar 4.18 P-Delta Arah Y | 105 |
| Gambar 4.19 Denah Balok Desain Lantai ME29 | 106 |
| Gambar 4.20 Denah Desain Kolom Lantai L22 | 115 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 4.21 Diagram Interaksi Kolom | 117 |
| Gambar 4.22 Denah Hubungan Balok Kolom Desain Lantai L22 | 118 |
| Gambar 4.23 Gaya Dalam <i>Pier</i> Struktur Potongan K | 119 |
| Gambar 4.24 Elemen D1 Desain Outrigger Truss | 120 |
| Gambar 4.25 Denah Dinding Geser Desain Lantai L22 | 122 |
| Gambar 4.26 Desain ETABS Model <i>Outrigger Truss</i> | 124 |
| Gambar 4.27 Respon Spektrum Desain | 125 |
| Gambar 4.28 <i>Ground Motion Excitation</i> San Fernando | 126 |
| Gambar 4.29 Respon Akselerasi San Fernando | 126 |
| Gambar 4.30 <i>Ground Motion Excitation</i> Imperial Valley | 126 |
| Gambar 4.31 Respon Akselerasi Imperial Valley | 127 |
| Gambar 4.32 <i>Ground Motion Excitation</i> Chi-Chi | 127 |
| Gambar 4.33 Respon Akselerasi Chi-Chi | 127 |
| Gambar 4.34 Range Skala Respon Akselerasi | 131 |
| Gambar 4.35 Hasil Skala Respon Spektrum | 133 |
| Gambar 4.36 Hasil <i>Scaling Ground Motion Excitation</i> San Fernando | 134 |
| Gambar 4.37 Hasil <i>Scaling Ground Motion Excitation</i> Imperial Valley | 134 |
| Gambar 4. 38 Hasil <i>Scaling Ground Motion Excitation</i> Chi-Chi | 134 |
| Gambar 4.39 <i>Frame Assignment Hinges</i> | 135 |
| Gambar 4.40 <i>Auto Hinge Assignment Beam</i> M3 | 136 |
| Gambar 4.41 <i>Input Sendi</i> Plastis Balok M3 | 136 |
| Gambar 4.42 <i>Auto Hinge Assignment Column</i> PMM | 137 |
| Gambar 4.43 <i>Input Sendi</i> Plastis Kolom PMM | 137 |
| Gambar 4.44 <i>Shell Assignment Hinge</i> PM | 138 |
| Gambar 4.45 Prosedur Masukan Data Momen Rotasi ATC-40 | 138 |
| Gambar 4.46 <i>Section Designer</i> ETABS Balok B104 | 140 |
| Gambar 4.47 Hasil Momen Kurvatur Balok B104 | 140 |
| Gambar 4.48 Kurva <i>Backbone</i> Balok B104 | 140 |
| Gambar 4.49 Kurva <i>Backbone</i> Balok B104 ETABS | 141 |
| Gambar 4.50 <i>Input Hinge</i> pada Model Struktur | 142 |
| Gambar 4.51 <i>Define Time Function</i> San Fernando | 142 |
| Gambar 4.52 <i>Input Time Function</i> Imperial Valley | 142 |
| Gambar 4.53 <i>Input Time Function</i> Chi-Chi | 143 |
| Gambar 4.54 <i>Input Load Case Initial Condition</i> | 143 |
| Gambar 4.55 <i>Input Load Case</i> San Fernando X dan Y | 143 |
| Gambar 4.56 <i>Input Load Case</i> Imperial Valley X dan Y | 144 |
| Gambar 4.57 <i>Input Load Case</i> Chi-Chi X dan Y | 144 |
| Gambar 4.58 <i>Base Shear</i> San Fernando | 145 |
| Gambar 4.59 <i>Base Shear</i> Imperial Valley | 145 |
| Gambar 4.60 <i>Base Shear</i> Chi-Chi | 146 |
| Gambar 4.61 <i>Displacement</i> Maksimum San Fernando | 147 |
| Gambar 4.62 <i>Displacement</i> Maksimum Imperial Valley | 147 |
| Gambar 4.63 <i>Displacement</i> Maksimum Chi-Chi | 147 |
| Gambar 4.64 <i>Drift</i> San Fernando | 148 |
| Gambar 4.65 <i>Drift</i> Imperial Valley | 148 |
| Gambar 4.66 <i>Drift</i> Chi-Chi | 149 |
| Gambar 4.67 Hasil Kinerja Evaluasi Gedung Gempa San Fernando | 151 |
| Gambar 4.68 Hasil Kinerja Gedung Gempa Imperial Valley | 151 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 4.69 Hasil Kinerja Gedung Gempa Chi-Chi | 152 |
| Gambar 4.70 <i>Auto Hinge Response</i> San Fernando | 153 |
| Gambar 4.71 <i>Auto Hinge Response</i> Imperial Valley | 154 |
| Gambar 4.72 <i>Auto Hinge Response</i> Chi-Chi | 154 |
| Gambar 4.73 Level Kinerja Akibat Gempa San Fernando X | 155 |
| Gambar 4.74 Level Kinerja Akibat Gempa San Fernando Y | 155 |
| Gambar 4.75 Level Kinerja Akibat Gempa Imperial Valley X | 156 |
| Gambar 4.76 Level Kinerja Akibat Gempa Imperial Valley Y | 156 |
| Gambar 4.77 Level Kinerja Akibat Gempa Chi-Chi X | 156 |
| Gambar 4.78 Level Kinerja Akibat Gempa Chi-Chi Y | 157 |



DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel 2.1 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum | 10 |
| Tabel 2.2 Koefisien Situs, F_a | 13 |
| Tabel 2.3 Koefisien Situs, F_v | 13 |
| Tabel 2.4 Kategori Desain Seismik Berdasarkan S_{DS} | 15 |
| Tabel 2.5 Kategori Desain Seismik Berdasarkan S_I | 15 |
| Tabel 2.6 Kombinasi Pembebanan | 16 |
| Tabel 3.1 Data Umum Struktur Penelitian | 23 |
| Tabel 3.2 Komponen Struktur | 32 |
| Tabel 3.3 Beban Gravitasi | 35 |
| Tabel 3.4 Koefisien Situs F_a | 37 |
| Tabel 3.5 Koefisien Situs F_v | 37 |
| Tabel 3.6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{DS} | 38 |
| Tabel 3.7 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{DI} | 38 |
| Tabel 3.8 Parameter Respon Spektrum | 39 |
| Tabel 3.9 Kombinasi Pembebanan | 42 |
| Tabel 3.10 Periode Masing-Masing Bagian | 43 |
| Tabel 3.11 Perhitungan Perbedaan Periode | 44 |
| Tabel 3.12 Perhitungan Perbedaan Kekakuan | 45 |
| Tabel 4.1 Rasio Partisipasi Modal Massa | 61 |
| Tabel 4.2 Faktor Skala Gempa | 64 |
| Tabel 4.3 Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) Arah X | 65 |
| Tabel 4.4 Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) Arah Y | 67 |
| Tabel 4.5 Pengecekan P-Delta Arah X | 70 |
| Tabel 4.6 Pengecekan P-Delta Arah Y | 72 |
| Tabel 4.7 Kontribusi <i>Frame</i> Model Eksisting | 75 |
| Tabel 4.8 Parameter Elemen Balok | 76 |
| Tabel 4.9 Gaya Dalam Balok B104 | 77 |
| Tabel 4.10 Perbedaan Perhitungan ETABS dan Manual | 81 |
| Tabel 4.11 Nilai a_{pr} dan M_{pr} | 82 |
| Tabel 4.12 Hasil Tulangan Geser ETABS | 84 |
| Tabel 4.13 Data Kolom Desain | 85 |
| Tabel 4.14 Gaya Dalam Kolom Desain | 86 |
| Tabel 4.15 Pengecekan <i>Strong Column Weak Beam</i> L22 | 87 |
| Tabel 4.16 Properti Fisik <i>Pier</i> 1 | 89 |
| Tabel 4.17 Rasio Partisipasi Modal Massa | 92 |
| Tabel 4.18 Faktor Skala Gempa | 94 |
| Tabel 4.19 Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) Arah X | 96 |
| Tabel 4.20 Simpangan Antar Lantai (<i>Story Drift</i>) Arah Y | 98 |
| Tabel 4.21 Pengecekan P-Delta Arah X | 100 |
| Tabel 4.22 Pengecekan P-Delta Arah Y | 102 |
| Tabel 4.23 Kontribusi <i>Frame</i> Model <i>Outrigger Truss</i> | 105 |
| Tabel 4.24 Parameter Elemen Balok | 106 |
| Tabel 4.25 Gaya Dalam Balok B104 | 108 |
| Tabel 4.26 Perbedaan Perhitungan ETABS dan Manual | 111 |
| Tabel 4.27 Nilai a_{pr} dan M_{pr} | 113 |
| Tabel 4.28 Hasil Tulangan Geser ETABS | 114 |

| | |
|---|-----|
| Tabel 4.29 Data Kolom Desain | 115 |
| Tabel 4. 30 Gaya Dalam Kolom Desain | 116 |
| Tabel 4.31 Pengecekan <i>Strong Column Weak Beam</i> L22 | 117 |
| Tabel 4.32 Data Material Baja IWF | 120 |
| Tabel 4.33 Gaya Dalam Pada Elemen D1 | 121 |
| Tabel 4.34 Selisih Perhitungan ETABS dan Manual | 121 |
| Tabel 4.35 Data Respon Akselerasi | 128 |
| Tabel 4.36 <i>Scaling Ground Motion</i> | 131 |
| Tabel 4.37 Titik Masukan Data Momen Rotasi ATC-40 | 139 |
| Tabel 4.38 Hasil Desain Envelope ETABS Balok B104 | 139 |
| Tabel 4.39 Hasil Perhitungan Parameter Kurva <i>Backbone</i> B104 | 141 |
| Tabel 4.40 Hasil <i>Base Shear</i> Maksimum | 146 |
| Tabel 4.41 <i>Interstory Drift Limit</i> ATC – 40 | 149 |
| Tabel 4.42 Level Kinerja ATC–40 | 150 |



DAFTAR NOTASI

| | |
|----------|---|
| A_{ch} | Luas penampang komponen struktur yang diukur sampai tepi luar tulangan transversal |
| A_g | Luas <i>bruto</i> penampang kolom |
| A_{sh} | Luas penampang total tulangan transversal |
| A_{st} | Luas total tulangan longitudinal non-prategang |
| b | Lebar penampang melintang kolom |
| b_c | Dimensi penampang inti komponen struktur yang diukur ke tepi luar tulangan transversal yang membentuk luas A_{sh} |
| c | Jarak dari serat tekan terluar ke garis netral |
| C_d | Faktor amplifikasi defleksi |
| C_m | Faktor yang menghubungkan diagram momen aktual ke diagram momen seragam ekuivalen |
| C_s | Koefisien respons gempa |
| C_{vx} | Faktor distribusi vertikal |
| D | Pengaruh dari beban mati |
| E | Pengaruh beban gempa |
| E_h | Pengaruh gaya gempa horizontal |
| E_v | Pengaruh gaya gempa vertikal |
| E_c | Modulus elastisitas beton |
| E_s | Modulus elastisitas tulangan dan baja struktural |
| EI | Kekakuan lentur komponen struktur tekan |
| F_a | Koefisien situs untuk periode pendek |
| F_v | Koefisien situs untuk periode panjang |
| f'_c | Kekuatan tekan beton yang disyaratkan |
| f_y | Kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan |
| f_{yt} | Kekuatan leleh tulangan transversal yang disyaratkan |
| g | Percepatan gravitasi |
| h | Tinggi penampang melintang kolom |
| I_e | Faktor keutamaan gempa |
| I_g | Momen inersia penampang beton <i>bruto</i> terhadap sumbu pusat |
| I_{se} | Momen inersia profil baja struktural, pipa, atau tabung terhadap sumbu pusat penampang komponen structural komposit |
| k | Faktor panjang efektif untuk komponen struktur tekan |
| L | Pengaruh beban hidup |
| l_u | Panjang tak tertumpu komponen struktur tekan |
| l_0 | Panjang, yang diukur dari muka <i>joint</i> sepanjang sumbu komponen struktur, di mana tulangan transversal khusus harus disediakan |
| M_1 | Momen ujung terfaktor yang lebih kecil pada komponen struktur tekan |
| M_2 | Momen ujung terfaktor yang lebih besar pada komponen struktur tekan |
| M_C | Momen terfaktor yang diperbesar untuk pengaruh kurvatur komponen struktur yang digunakan untuk desain komponen struktur tekan |
| M_u | Momen terfaktor pada penampang |
| P_c | Kekuatan beban aksial akibat kontribusi beton |
| P_{st} | Kuat beban aksial akibat kontribusi baja |

| | |
|-----------------|--|
| P_u | Gaya aksial terfaktor, diambil sebagai positif untuk tekan dan negatif untuk tarik |
| P_0 | Kekuatan aksial nominal pada eksentrisitas nol |
| P_n | Kekuatan aksial nominal penampang |
| P_{nb} | Kuat beban aksial nominal pada kondisi regangan seimbang |
| Q | Indeks stabilitas untuk suatu tingkat |
| R | Koefisien modifikasi respons gempa |
| R_u | Kekuatan perlu |
| R_n | Kekuatan rencana |
| r | Radius girasi penampang komponen struktur tekan |
| S_s | Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek, redaman 5 persen |
| S_l | Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik, redaman 5 persen |
| S_{MS} | Parameter percepatan respons spektral MCE pada periode pendek yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs |
| S_{DI} | Parameter percepatan respons spektral MCE pada periode 1 detik, redaman 5 persen |
| s | Sisi penampang benda uji |
| s | Spasi pusat ke pusat suatu benda, misalnya tulangan longitudinal, tulangan transversal, tendon, kawat atau angkur prategang |
| s_o | Spasi pusat ke pusat tulangan transversal dalam panjang l_o |
| T_x | Periode fundamental bangunan arah-x |
| T_y | Periode fundamental bangunan arah-y |
| t | Tinggi benda uji |
| V | Geser desain total di dasar struktur dalam arah yang ditinjau |
| V_u | Gaya geser terfaktor pada penampang |
| V_{us} | Geser horizontal terfaktor pada suatu tingkat |
| W | Berat seismik efektif bangunan |
| ϕ | Faktor reduksi kekuatan |
| β_1 | Faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral |
| ϵ_{cu} | Batas regangan beton |
| ϵ_t | Regangan tarik <i>netto</i> dalam lapisan terjauh baja tarik longitudinal pada kuat nominal |
| ϵ_y | Regangan leleh baja |
| ρ | Faktor redundansi struktur |
| σ | Tegangan yang terjadi |
| σ_{ijin} | Tegangan izin yang disyaratkan |
| Δ_s | Defleksi tegak lurus bidang yang dihitung di tengah tinggi dinding akibat dari beban layan |
| Δ_u | Defleksi yang dihitung di tengah tinggi akibat dari beban terfaktor |
| δ_s | Faktor pembesaran momen untuk rangka yang tidak di-breising (<i>braced</i>) terhadap simpangan, untuk mencerminkan <i>drift</i> lateral yang dihasilkan dari beban lateral dan gravitasi |
| δ_x | Defleksi pusat massa di tingkat-x/ <i>story drift</i> |
| μ_Δ | Daktilitas perpindahan |
| Ω_0 | Faktor kuat lebih |

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran L.1 Pemodelan Struktur
Lampiran L.2 Data Gempa

161
164

