Indonesia merupakan negara yang berada di wilayah Cincin Api Pasifik, sehingga sangat rentan terhadap bencana gempa bumi. Sejarah mencatat berbagai kejadian gempa besar seperti di Aceh (2004), Yogyakarta (2006), dan Palu (2018) yang menyebabkan kerusakan struktural signifikan dan korban jiwa. Oleh karena itu, perancangan struktur bangunan yang tahan gempa menjadi krusial untuk meminimalkan risiko, memastikan keselamatan penghuni, dan mempertahankan fungsi bangunan pasca-gempa. Standar Nasional Indonesia (SNI) menyediakan pedoman teknis untuk ini, khususnya SNI 1726:2019 tentang "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung" dan SNI 2847:2019 tentang "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung". Kedua standar ini diadaptasi dari standar internasional seperti ASCE 7-16 dan ACI 318M-14, dengan penyesuaian kondisi lokal Indonesia. SNI 1726:2019 fokus pada prosedur analisis dan desain seismik secara umum, sementara SNI 2847:2019 menekankan persyaratan material, detail penulangan, dan elemen struktural beton untuk ketahanan gempa. Kedua standar ini wajib diterapkan untuk bangunan baru sejak Februari 2022, dengan tujuan mencapai performa struktur yang daktil, sehingga mampu menyerap energi gempa tanpa kolaps total.

Konsep perancangan struktur beton tahan gempa sesuai SNI menekankan prinsip desain berbasis performa, di mana struktur dirancang untuk menahan gaya seismik dengan mempertimbangkan kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi. Pendekatan ini bertujuan agar struktur tetap elastis pada gempa kecil, mengalami kerusakan terkontrol pada gempa sedang, dan mencegah kolaps pada gempa besar (Maximum Considered Earthquake Risk-Targeted atau MCER).

SEKILAS TENTANG PENULIS

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T., AU HAKI., IPU., ASEAN Eng. - (Ahli Teknik Bangunan Gedung Jenjang 9, Ahli Geoteknik Jenjang 9, dan Ahli Jembatan Jenjang 9).

Penulis merupakan dosen di Institut Sains dan Teknologi Nasional (ISTN) di Jakarta, mengajar Mata Kuliah Struktur Baja, Struktur Beton dan Pondasi. Penulis juga praktisi profesional dan Direktur Teknik PT TAP Rekayasa Struktur di Bekasi.

Harun Napitupulu, S.T., M.T. - (Ahli Muda Teknik Bangunan Gedung Jenjang 7).

Penulis merupakan lulusan Sarjana Teknik dari Universitas Jakarta dan Magister Teknik dari Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta. Penulis seorang praktisi profesional di dunia teknik sipil.

nasmedia
Penerbit Anggota IKAPI
PT Nas Media Indonesia
Sidorejo, Prambanan, Klaten 55584
Batua Raya No. 3 Makassar 90233
+62811 42 2017
@nasmedia.id nasmedia.id

KATEGORI BUKU 18+

Harga P. Jawa Rp 00.000,-

DESAIN GEDUNG KANTOR 26 LANTAI MENGGUNAKAN SISTEM GANDA

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. IPU, AU HAKI, Asean Eng
Harum Napitupulu, S.T., M.T.

Panduan Praktis

Jilid 5

DESAIN GEDUNG KANTOR 26 LANTAI MENGGUNAKAN SISTEM GANDA

SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1727:2020,SNI 1729:2020, SNI 8460:2017

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. IPU, AU HAKI, Asean Eng
Harum Napitupulu, S.T., M.T.

2025

DESAIN GEDUNG KANTOR 26 LANTAI MENGGUNAKAN SISTEM GANDA

TANPA SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMBERBANYAK BUKU
Pustaka

Sanksi Pelanggaran Hak Cipta

UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

Ketentuan Pidana
Pasal 113

1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

DESAIN GEDUNG KANTOR 26 LANTAI MENGGUNAKAN SISTEM GANDA

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. IPU, AU HAKI, Asean Eng
Harun Napitupulu, S.T., M.T.

Diterbitkan oleh
PT. Nas Media Indonesia
2025

DESAIN GEDUNG KANTOR 26 LANTAI MENGGUNAKAN SISTEM GANDA

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. IPU, AU HAKI, Asean Eng
Harun Napitupulu, S.T., M.T.

Copyright © T. A. Prasetyo & H. Napitupulu 2025
All rights reserved

Layout : Risma Amanda Putri
Desain Cover : Tim Penulis
Image Cover : Freepik.com

Cetakan Pertama, September 2025
xxii + 246 hlm; 21 x 29.7 cm

ISBN xxx-xxx-xxx-xxx-x
E-ISBN xxx-xxx-xxx-xxx-x

Diterbitkan oleh Penerbit Nasmedia
PT. Nas Media Indonesia
Anggota IKAPI
No. 018/SSL/2018
Sidorejo, Prambanan, Klaten 55584
Jl. Batua Raya No. 3, Makassar 90233
Telp. 0811 42 2017
0811 49 2022
0813 4111 6363
redaksi@nasmedia.id
www.nasmedia.id
Instagram: @nasmedia.id
Fanspage: nasmedia.id
Youtube: nasmedia entertainment

Ibu Suryani, Komisaris PT TAP Rekayasa Struktur
Ashrafi Raihan Tsaqif (Putra ke 1, Mahasiswa aktif tahap akhir UMJ)
Muhammad Rizqi Yusuf (Putra ke 2)
Ir. Totok Andi Prasetyo S.T., M.T.

Adalah seorang akademisi, praktisi yang andal yang dari dulu beliau tidak kenal lelah untuk selalu belajar dan belajar sampai bisa seperti ini dengan perjuangan yang tinggi.

Untuk menjadi ahli baja, beliau menimba ilmu kepada siapa saja tanpa perlu malu bertanya kepada yang lebih muda sekali pun. Sebab, menurut beliau, ilmu itu luas jadi siapa pun bisa belajar dari mana saja.

Dengan bangga kami sebagai keluarga, anak, serta istri beliau merasa bersyukur sampai di titik ini. Semua perlu proses yang panjang dan dengan kesabaran kami, Alhamdulillah beliau bisa jadi Dosen Direktur dan Asesor.

Selamat atas pencapaian beliau sebagai penulis buku tentang struktur untuk para generasi penerus bangsa terutama di bidang struktur.

PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN
Pustaka

Abdul Rochim
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Islam Sultan Agung

Alhamdulillah, selamat dan sukses saya ucapkan kepada Ir. Totok Andi Prasetyo, S.T., M.T. atas terbitnya buku kelimanya yang berjudul ***Panduan Praktis Desain Gedung Kantor 26 Lantai Menggunakan Sistem Ganda***. Belum banyak buku teks yang kontennya senada dengan konten yang ada di buku ini, sehingga buku ini bisa menjadi rujukan dalam mendesain bangunan dengan struktur komposit. Menariknya, buku ini dapat menjelaskan secara detail langkah demi langkah bagaimana mendesain suatu bangunan tingkat tinggi. Harapan besar semoga buku ini dapat menjadi sumbangsih di dunia pendidikan dan ketekniksipilan.

Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T
Guru Besar Unissula Semarang

Saya ucapkan selamat kepada saudara Ir. Totok A. Prasetyo, M.T., IPU. yang telah kembali menerbitkan karyanya dalam bentuk buku mengenai petunjuk praktis untuk bangunan tingkat tinggi berdasarkan SNI yang terakhir. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat terutama kepada praktisi sebagai salah satu referensi dalam merencanakan struktur gedung tingkat tinggi.

PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN Pustaka

Dr.Ir. Sumirin, M.S.
Dosen Teknik Sipil / Struktur Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Buku tulisan Pak Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. dengan judul *Panduan Praktis Desain (Struktur) Gedung Kantor 26 Lantai Menggunakan Sistem Ganda* ini sangat bermanfaat bagi para praktisi bidang struktur bangunan gedung dan juga bagi para mahasiswa serta dosen. Penerapan beberapa standar terbaru di Indonesia, antara lain SNI 1726:2019 (perencanaan ketahanan gempa), SNI 1727:2020 (beban desain minimum), dan SNI 2847:2019 (persyaratan beton struktural) untuk bangunan tinggi masih diperlukan contoh penerapannya, sehingga buku ini akan bermanfaat untuk meningkatkan mutu bangunan gedung di Indonesia.

Saya ucapkan selamat dan sukses atas terbitnya buku ini. Ya Allah, jadikanlah buku ini sebagai amal jariah yang mendatangkan keberkahan bagi Pak Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T. dan keluarga.

PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN Pustaka

Ir. Suryawan Murtiadi, M.Eng., Ph.D.
Dekan Fakultas Teknik
Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta

Setelah menyelesaikan buku ke-1 hingga ke-4 tentang struktur baja, buku ini merupakan buku ke-5 tentang struktur beton yang ditulis oleh **Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T., IPU., AU HAKI., ASEAN Eng.,** seorang akademisi dan praktisi yang berpengalaman dalam bidang rekayasa struktur dalam dunia konstruksi.

Buku ini menyajikan dengan jelas dan runtut mulai konsep perancangan struktur beton pada bangunan tingkat tinggi, pemodelan, sampai pada analisis dan desain tahan gempa sesuai dengan standar peraturan terkini.

Semoga buku ini memberi kontribusi dan solusi yang bermanfaat bagi para mahasiswa, akademisi, dan praktisi yang terus dituntut untuk selalu memperkaya literasi serta adaptif terhadap perkembangan teknologi.

Jakarta, 31 Juli 2025

Ir. Ismono Kusmaryono, M.T.
Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil ISTN.

Terima kasih kepada Ir Totok Andi Prasetyo M.T., IPU., AU HAKI., ASEAN Eng., yang telah menulis buku yang berjudul *Desain Gedung Kantor 26 Lantai Menggunakan Sistem Ganda.* Buku ini dapat menjadi panduan praktis bagi mahasiswa dan para praktisi dalam melakukan perencanaan gedung bertingkat tinggi dengan menggunakan perangkat lunak. Semoga buku ini bermanfaat bagi penulis dan pembacanya.

Dr. Ir. Nathan Madutujuh, M.T.
Ahli Utama Haki

Perencanaan gedung bertingkat tahan gempa di Indonesia terus berkembang dengan tersedianya berbagai buku peraturan perencanaan dan software yang dapat digunakan.

Untuk itu, buku *Panduan Praktis Desain Gedung Kantor 26 Lantai dengan Sistem Ganda* hasil karya Ir. Totok Prasetyo, M.T ini sangat bermanfaat bagi perencana struktur dalam memahami dan menerapkan peraturan desain yang ada dalam pekerjaan sehari-hari. Selamat dan sukses selalu!

PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN Pustaka

Wong Foek Tjong, S.T., M.T., Ph.D
Dosen desain struktur baja dan peneliti dalam bidang metode elemen hingga, Universitas Kristen Petra, Surabaya.

Suatu kehormatan bagi saya diundang kembali untuk memberi testimoni dari buku kelima hasil karya Bapak Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T dan tim. Kalau buku-buku sebelumnya lebih berfokus kepada desain struktur baja, kali ini desain struktur beton. Seperti buku-buku beliau sebelumnya, saya yakin buku ini akan sangat bermanfaat bagi mahasiswa teknik sipil yang sedang belajar desain struktur beton dan insinyur pemula yang sedang mengembangkan profesinya sebagai *structural engineer*. Keistimewaan buku ini adalah contoh desain yang diangkat dari pengalaman nyata penulis. Saya berterima kasih kepada penulis yang telah meluangkan banyak waktu untuk berbagi pengalaman praktik desain melalui buku-bukunya.

Donny B Tampubolon
Associate Struktur PT TAP Rekayasa Struktur.

Dengan menguasai buku ini, pembacanya diharapkan dapat memahami perencanaan gedung tinggi. Terima kasih untuk Bapak Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T dan tim yang telah membuka cakrawala pengetahuan mengenai seni merencanakan bangunan baja dan beton selama secara aktual dari pengalaman kerjanya selama ini. Dan yang terpenting, kasus diambil dari dunia kerja nyata.
Sukses dalam berkarya di bidang *Civil Engineering*, PT TAP Rekayasa Struktur.

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI ..... **xi**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiii**
DAFTAR TABEL ..... **xix**

BAB 1
PENDAHULUAN **1**

A. Konsep Perancangan Struktur Beton Tahan Gempa 1
B. Desain Seismik Rangka Pemikul Momen Khusus dan Dinding Geser 6

BAB 2
PEMODELAN STRUKTUR **15**

A. Data Umum Bangunan 15
B. Pembuatan Grid 16
C. Pembuatan Properti Material 23
D. Pembuatan Properti Penampang 28
E. Pemodelan Balok, Kolom, Pelat dan *Shear Wall* 37

BAB 3
PEMBEBANAN STRUKTUR **45**

A. Pembebanan Pada Struktur Rangka Momen Khusus dan Dinding Geser 45
B. Beban Mati Pada Struktur 46
C. Beban Hidup pada Struktur 47
D. Pembuatan *Load Pattern* untuk Masing-Masing Pembebanan 48
E. Aplikasi Beban pada Struktur Melalui ETABS 50

BAB 4
ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR RANGKA DUAL SISTEM MOMEN KHUSUS TERHADAP BEBAN GEMPA **58**

A. Analisis Kegempaan pada Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus 58
B. Pemilihan Sistem Struktur 72

BAB 5
BENTUK ALAMI GETARAN **152**

A. Bentuk Getar Alami (*Mode Shape*) 152
B. Partisipasi Massa 154

BAB 6
PERHITUNGAN GAYA GEMPA 158

A. Pusat Massa dan Pusat Kekakuan 158
B. Perhitungan Pembesaran Momen Torsi tak Terduga 163

BAB 7
PENULANGAN SISTEM GANDA 170

A. Penulangan Lentur dan Geser Pada Balok 170
B. Penulangan Lentur dan Geser Pada Kolom 182
C. Penulangan Geser Joint Balok - Kolom 192
D. Pengecekan Rasio SCWB 200
E. Perhitungan Kemampuan SRPMK Dalam Menanggung Minimal 25% Gaya Gempa Nominal 204
F. Perhitungan *Confinement* Kolom 205

BAB 8
PENULANGAN DINDING GESER 207

A. Pengecekan Awal 207
B. Pengecekan Kebutuhan *Boundary Element* Dengan *Simplify* (C&T) 208
C. Desain Tulangan Lentur 211
D. Pengecekan D/C *Ratios* 212
E. Desain Tulangan Geser Pada *Shear Wall* 213
F. Desain Tulangan Pengekang Pada *Shear Wall* 213
G. Pengecekan Pada Taraf Penjepitan (Rasio Runtuh Geser dan Lentur) 216

DAFTAR PUSTAKA 218
LAMPIRAN 219
LATAR BELAKANG PENULIS 232

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus 7
Gambar 1.2 Dinding Geser 7
Gambar 1.3 Kuat Geser Nominal Pada *Joint* (Vn *Joint*) 13
Gambar 1.4 Konstruksi Sambungan Balok-Kolom 14
Gambar 2.1 *Software* ETABS 15
Gambar 2.2 *Site Plan* Kawasan Gedung Kantor 16
Gambar 2.3 Denah Arsitektur Gedung Kantor 16
Gambar 2.4 Opsi Grid pada *Software* ETABS 17
Gambar 2.5 Tampilan Awal Model Pada ETABS 17
Gambar 2.6 Menyesuaikan Penggunaan Satuan 18
Gambar 2.7 Tahap Selanjutnya dalam Membuat *Grid* 18
Gambar 2.8 *Edit Story and Grid System Data* 19
Gambar 2.9 *Modify/Show Grid System* 20
Gambar 2.10 *Edit Grid System* 20
Gambar 2.11 *Modify/Show Story Data* 21
Gambar 2.12 *Story Data* 22
Gambar 2.13 *Grid* yang Telah Dibuat 23
Gambar 2.14 *Define Material Properties* 24
Gambar 2.15 Define Materials 24
Gambar 2.16 *Concrete Material Property Data* 25
Gambar 2.17 *Concrete Material Property Design Data* 25
Gambar 2.18 *Rebar Material Property Data* 27
Gambar 2.19 *Rebar Material Property Design Data* 28
Gambar 2.20 *Slab Properties* 28
Gambar 2.21 *Slab Property Data* 29
Gambar 2.22 *Property/Stiffness Modification Factors for Slab* 29
Gambar 2.23 *Frame Properties* 30

Gambar 2.24 *Frame Property Shape Type* 30
Gambar 2.25 *Frame Section Property Data* 31
Gambar 2.26 *Property/Stiffness Modification Factor for Reinforcement Concrete Beam* 32
Gambar 2.27 *Frame Properties* 32
Gambar 2.28 *Frame Property Shape Type* 33
Gambar 2.29 *Frame Section Property Data* 33
Gambar 2.30 *Property Stiffness Modification Factor for Reinforcement Cooncrete Column* 34
Gambar 2.31 *Modify/Show Rebar* 35
Gambar 2.32 *Wall Properties* 36
Gambar 2.33 *Wall Property Data* 36
Gambar 2.34 Faktor Modifikasi Dinding Geser 36
Gambar 2.35 *Set Plan View* 37
Gambar 2.36 *Draw Beam* 38
Gambar 2.37 *Properties of Object (Beam)* 38
Gambar 2.38 Balok yang Sudah Termodelkan 39
Gambar 2.39 *Quick Draw Column* 40
Gambar 2.40 Properties of Object (Column) 40
Gambar 2.41 Kolom yang Sudah Termodelkan 41
Gambar 2.42 *Draw Floor/Wall Object* 42
Gambar 2.43 Pelat Lantai yang Sudah Termodelkan 43
Gambar 2.44 Mengembalikan Tampilan Menjadi 3D 43
Gambar 2.45 Opsi Untuk Memodelkan Dinding Geser/*Shear Wall* 44
Gambar 2.46 Membuat *Shear Wall* di Lantai Dasar 44
Gambar 2.47 Keseluruhan *Shear Wall* yang Termodelkan 44
Gambar 3.1 *Define Load Pattern* 49
Gambar 3.2 *Add New Load Patterns* 49
Gambar 3.3 *Assign Loads* 50
Gambar 3.4 *Slab Sections* 51

Gambar 3.5 *Shell Uniform Loads* 52
Gambar 3.6 *Shell Load Assignment* 52
Gambar 3.7 Beban Hidup pada Pelat Lantai Yang Telah diaplikasikan 53
Gambar 3.8 Beban Mati Tambahan pada Pelat Lantai yang Telah Diaplikasikan ... 54
Gambar 3.9 *Frame Sections* 55
Gambar 3.10 *Select by Frame Propoerty* 55
Gambar 3.11 *Frame Loads* 56
Gambar 3.12 Beban Mati Tambahan pada Pelat Balok yang Telah Diaplikasikan 57
Gambar 4.1 Menentukan Nilai Ss dari *Website* Desain Spektra Indonesia 68
Gambar 4.2 *Summary* Parameter Respons Spektrum 68
Gambar 4.3 *Define Functions Response Spectrum* 69
Gambar 4.4 *Define Response Spectrum Functions* 70
Gambar 4.5 *Input Response Spectrum Functions Parameters* 70
Gambar 4.6 Mendefinisikan Pola Pembebanan 74
Gambar 4.7 Mendefinisikan Pola untuk Beban Gempa 74
Gambar 4.8 Input Nilai Faktor R, Cd, dan Ω0 75
Gambar 4.9 Menentukan Periode Getar Struktur 77
Gambar 4.10 Ketentuan Berat Seismik Efektif 78
Gambar 4.11 Menyesuaikan Penggunaan Satuan 78
Gambar 4.12 *Choose Tables for Display* 79
Gambar 4.13 Persamaan Gaya Geser Dasar Seismik 80
Gambar 4.14 Persamaan Koefisien Respons Seismik 81
Gambar 4.15 *Display Story Respons Plots* 81
Gambar 4.16 *Auto Lateral Load to Diaphragm D1 (Load Pattern SE-X)* 82
Gambar 4.17 *Auto Lateral Load to Diaphragm D1 (Load Pattern SE-Y)* 83
Gambar 4.18 Pasal 7.9.1.2 SNI 1726:2019 84
Gambar 4.19 *Define Load Cases* 85
Gambar 4.20 *Add New Cases* 85
Gambar 4.21 *Load Cases Data for RS -X Uns* 86
Gambar 4.22 *Load Cases Data for RS -Y Uns* 87

Gambar 4.23 *Check Model* 88
Gambar 4.24 *No Warning Message After Doing Check Model* 88
Gambar 4.25 *Hasil Concrete Frame Design* 89
Gambar 4.26 *Choose Table for Display* 89
Gambar 4.27 *Select Load Patterns* 90
Gambar 4.28 *Set Load Cases Selection* 90
Gambar 4.29 *Set Combo Selection* 91
Gambar 4.30 Penentuan Faktor Skala Untuk Gaya Geser Dasar 92
Gambar 4.31 Penskalaan Gaya 92
Gambar 4.32 *Load Cases Data for RS -X Scaled* 93
Gambar 4.33 *Load Cases Data for RS -Y Scaled* 94
Gambar 4.34 Penentuan Simpangan Antar Tingkat 98
Gambar 4.35 *Display Story Response Plots* 100
Gambar 4.36 *RS – X Unscale Diaphragma Center of Mass Displacement* 100
Gambar 4.37 *RS – Y Unscale Diaphragma Center of Mass Displacement* 101
Gambar 4.38 *Choose Tables for Display* 104
Gambar 4.39 *Set Load Case Selection* 104
Gambar 4.40 *Set Combo Selection* 105
Gambar 4.41 Bentuk-Bentuk Ketidakberaturan Horizontal 115
Gambar 4.42 Denah Gedung Kantor 26 Lantai 116
Gambar 4.43 Lx dan Px pada Ketidakberaturan Sudut Dalam 120
Gambar 4.44 Penentuan Luasan Bukaan 121
Gambar 4.45 Bentuk-Bentuk Ketidakberaturan Vertikal 124
Gambar 4.46 Portal Bangunan 125
Gambar 4.47 *Choose Table for Display* 129
Gambar 4.48 *Column Information* 132
Gambar 4.49 *Choose Table for Display* 134
Gambar 4.50 *Vertical Force Distribution with Diaphragm Force* 138
Gambar 4.51 *Design Forces for Vertical Elements and Diaphragm Force* 139
Gambar 4.52 Warna Momen Pelat Lantai 145

Gambar 4.53 *Section Cut Forces* untuk Tulangan Kord 146
Gambar 4.54 Detail Pemasangan Tulangan Kord 146
Gambar 4.55 *Section Cut Forces* untuk Tulangan Kolektor 147
Gambar 5.1 *Mode Shape* 1 (arah X atau UX) 153
Gambar 5.2 *Mode Shape* 2 (arah Y atau UY) 153
Gambar 5.3 *Mode Shape* 3 (arah Z atau UZ) 154
Gambar 5.4 *Choose Table for Display* 155
Gambar 6.1 *Set Load Cases to Run* 159
Gambar 6.2 *Choose Table for Display* 160
Gambar 6.3 *Choose Table for Display* 164
Gambar 7.1 *Sample* Penulangan Balok 171
Gambar 7.2 *Choose Tables for Display* 174
Gambar 7.3 Sketsa Balok B46-2 174
Gambar 7.4 Sketsa Penulangan Balok B46-2 Daerah Tumpuan dan Lapangan 182
Gambar 7.5 *Sample* Penulangan Kolom 184
Gambar 7.6 Sketsa Kolom 800 x 800 184
Gambar 7.7 *Choose Tables for Display* 185
Gambar 7.8 *Software SPColumn* 187
Gambar 7.9 Penyesuaian Mutu Bahan 187
Gambar 7.10 Penyesuaian *Section* 188
Gambar 7.11 Diagram Interaksi Kolom Dengan Gaya yang Paling Besar 189
Gambar 7.12 Sketsa Penulangan Kolom 800 x 800 192
Gambar 7.13 Luas *Joint* Efektif 193
Gambar 7.14 *Joint Shear Capacity Ratios* 193
Gambar 7.15 *Sample* Penulangan Geser *Joint* Balok - Kolom 194
Gambar 7.16 Tiga Dimensi *Sample* Penulangan Geser *Joint* Balok – Kolom 195
Gambar 7.17 Letak AS Kolom dan Balok 195
Gambar 7.18 *Cek Joint Shear Capacity Ratios* AS G2-A 196
Gambar 7.19 *Column P-M-M Interaction Ratios* 202
Gambar 7.20 Cek *Column P-M-M Interaction Ratios* AS G2-A 202

Gambar 7.21 *Beam/Column Capacity Ratios* 203
Gambar 7.22 Cek *Beam/Column Capacity Ratios* AS G2-A 203
Gambar 8.1 Kebutuhan Luas Tulangan Lentur *Shear Wall* 211
Gambar 8.2 *D/C Ratios Shear Wall* 212

SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA Pustaka

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Klasifikasi Kelas Mutu Beton 2

Tabel 1.2 Klasifikasi Mutu Beton 3

Tabel 1.3 Koefisien untuk SRPMK dan Dinding Geser 9

Tabel 1.4 Kuat Geser Nominal pada *Joint* (Vn *Joint*) 12

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Tulangan Baja 26

Tabel 2.2 Faktor untuk Menentukan Fye dan Fue Tulangan Baja 27

Tabel 2.3 Faktor Modifikasi Kekakuan 31

Tabel 3.1 Massa Jenis Baja dan Beton 46

Tabel 3.2 Massa Jenis Berbagai Material 46

Tabel 4.1 Koefisien untuk Dual Sistem 59

Tabel 4.2 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non-Gedung untuk Beban Gempa 61

Tabel 4.3 Faktor Keutamaan Gempa (Ie) 62

Tabel 4.4 Data *Bore Hole* 2 63

Tabel 4.5 Data *Bore Hole* 3 65

Tabel 4.6 Klasifikasi Situs 67

Tabel 4.7 Koefisien Situs (Fa) 71

Tabel 4.8 Koefisien Situs (Fv) 71

Tabel 4.9 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS}) 72

Tabel 4.10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1}) 72

Tabel 4.11 Faktor R, Cd, dan Ω0 untuk Sistem Ganda 73

Tabel 4.12 Nilai Parameter Periode Pendekatan 75

Tabel 4.13 Nilai Cu 76

Tabel 4.14 Nilai Periode Struktur yang Digunakan 76

Tabel 4.15 Nilai Periode Getar Struktur (Tx dan Ty) dari ETABS 77

Tabel 4.16 *Mass Summary by Story* 79

Tabel 4.17 Perhitungan Berat Seismik Efektif 80
Tabel 4.18 Perhitungan Gaya Geser Dasar Seismik 81
Tabel 4.19 Memunculkan Gaya *Auto Lateral* 82
Tabel 4.20 Perhitungan Faktor Skala Awal 84
Tabel 4.21 Gaya Geser Dasar/*Base Reactions* yang Belum Diskalakan 91
Tabel 4.22 Perhitungan Penskalaan Gaya 92
Tabel 4.23 Gaya Geser Dasar/*Base Reactions* yang Telah Diskalakan 94
Tabel 4.24 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur 96
Tabel 4.25 Simpangan Antar Tingkat Izin 99
Tabel 4.26 Simpangan Antar Tingkat 102
Tabel 4.27 *Story Forces* 106
Tabel 4.28 *Output Case Service* 108
Tabel 4.29 Input Nilai P 109
Tabel 4.30 *Output Case RS – X Scaled* 110
Tabel 4.31 *Output Case RS – Y Scaled* 111
Tabel 4.32 Hasil Perhitungan P-Delta 112
Tabel 4.33 Ketidakberaturan Horizontal 114
Tabel 4.34 *Story Max Over Avg Drift on RS – X Scaled* 117
Tabel 4.35 *Story Max Over Avg Drift on RS – Y Scaled* 118
Tabel 4.36 Pengecekan Ketidakberaturan Torsi 119
Tabel 4.37 Pengecekan Ketidakberaturan Sudut Dalam 120
Tabel 4.38 Pengecekan Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma 121
Tabel 4.39 Ketidakberaturan Vertikal 123
Tabel 4.40 *Story Stiffness on RS – X Scaled* 126
Tabel 4.41 *Story Stiffness on RS – Y Scaled* 127
Tabel 4.42 *Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak* 128
Tabel 4.43 *Mass Summary by Story* 130
Tabel 4.44 Pengecekan Ketidakberaturan Massa 131
Tabel 4.45 Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal 133
Tabel 4.46 RS – X *Scaled Story Forces* 135

Tabel 4.47 RS – Y *Scaled Story Forces* 136
Tabel 4.48 Pengecekan Ketidakberaturan Tingkat Lemah 137
Tabel 4.49 Rangkuman Diafragma 140
Tabel 4.50 Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah X dengan Meninjau Dimensi Diafragma (S/De) 141
Tabel 4.51 Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah Y dengan Meninjau Dimensi Diafragma (S/De) 142
Tabel 4.52 Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah X dengan Meninjau Defleksi Diafragma 143
Tabel 4.53 Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah Y dengan Meninjau Defleksi Diafragma 144
Tabel 5.1 *Modal Participating Mass Ratios* 156
Tabel 6.1 *Center of Mass and Rigidity* 161
Tabel 6.2 *Summary Center of Mass and Rigidity* 162
Tabel 6.3 *Export Current Table to Excel* 165
Tabel 6.4 *Joint Displacement A*rah X 166
Tabel 6.5 *Joint Displacement* Arah Y 167
Tabel 6.6 Pembesaran Momen Torsi Tak Terduga Arah X 168
Tabel 6.7 Pembesaran Momen Torsi Tak Terduga Arah Y 169
Tabel 7.1 Cek Penulangan Balok B46-1 172
Tabel 7.2 Properti Material dan Penampang 173
Tabel 7.3 *Sort on M3 from Smallest to Largest* 176
Tabel 7.4 Input Gaya Dalam dan Cek Syarat Geometri 177
Tabel 7.5 Penulangan Lentur pada Tumpuan Negatif/Bagian Atas Balok 178
Tabel 7.6 Penulangan Lentur pada Tumpuan Positif/Bagian Bawah Balok 179
Tabel 7.7 Penulangan Lentur pada Lapangan Negatif/Bagian Atas Balok 180
Tabel 7.8 Penulangan Lentur pada Lapangan Positif/Bagian Bawah Balok 181
Tabel 7.9 Hasil Expor *Element Forces - Column* 185
Tabel 7.10 186*Element Forces – Column* yang Akan Disortir 186
Tabel 7.11 *Element Forces – Column* yang Telah Disortir Berupa Aksial - Lentur 186

Tabel 7.12 Input Factored Loads 188
Tabel 7.14 Cek SCWB..... 190
Tabel 7.13 *Summary* Mnx dan Mny..... 190
Tabel 7.15 Kekuatan Geser Nominal *Joint*..... 194
Tabel 7.16 Input Properti Material..... 197
Tabel 7.17 Input Dimensi *Joint* dan Gaya Tulangan Balok..... 198
Tabel 7.18 Input Gaya Geser 199
Tabel 7.19 Input Gaya Geser Total *Joint*..... 200
Tabel 7.20 Persentasi SRPMK Minimal 25%..... 205
Tabel 7.22 Perhitungan Tulangan *Confinement* Kolom..... 206
Tabel 8.1 Lokasi *Boundary Element* pada *Shear Wall* 209
Tabel 8.2 Panjang *Boundary Element* pada *Shear Wall* 210
Tabel 8.3 Hasil Perhitungan Tulangan Pengekang pada *Shear Wall*..... 215
Tabel 8.4 Hasil Perhitungan Rasio Runtuh Geser dan Lentur pada *Shear Wall*... 217

BAB 1

PENDAHULUAN

PENERBIT DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN
Pustaka

A. Konsep Perancangan Struktur Beton Tahan Gempa

Indonesia merupakan negara yang berada di wilayah Cincin Api Pasifik, sehingga sangat rentan terhadap bencana gempa bumi. Sejarah mencatat berbagai kejadian gempa besar seperti di Aceh (2004), Yogyakarta (2006), dan Palu (2018) yang menyebabkan kerusakan struktural signifikan dan korban jiwa. Oleh karena itu, perancangan struktur bangunan yang tahan gempa menjadi krusial untuk meminimalkan risiko, memastikan keselamatan penghuni, dan mempertahankan fungsi bangunan pasca-gempa. Standar Nasional Indonesia (SNI) menyediakan pedoman teknis untuk ini, khususnya SNI 1726:2019 tentang "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung" dan SNI 2847:2019 tentang "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung". Kedua standar ini diadaptasi dari standar internasional seperti ASCE 7-16 dan ACI 318M-14, dengan penyesuaian kondisi lokal Indonesia. SNI 1726:2019 fokus pada prosedur analisis dan desain seismik secara umum, sementara SNI 2847:2019 menekankan persyaratan material, detail penulangan, dan elemen struktural beton untuk ketahanan gempa. Kedua standar ini wajib diterapkan untuk bangunan baru sejak Februari 2022, dengan tujuan mencapai performa struktur yang daktil, sehingga mampu menyerap energi gempa tanpa kolaps total.

Konsep perancangan struktur beton tahan gempa sesuai SNI menekankan prinsip desain berbasis performa, di mana struktur dirancang untuk menahan gaya seismik dengan mempertimbangkan kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi. Pendekatan ini bertujuan agar struktur tetap elastis pada gempa kecil, mengalami kerusakan terkontrol pada gempa sedang, dan mencegah kolaps pada gempa besar (*Maximum Considered Earthquake Risk-Targeted* atau MCER).

Persyaratan desain dan pendekatan bisa disesuaikan dengan tingkat respons inelastik yang diasumsikan dalam perhitungan gaya gempa desain. Maka dari itu, ada istilah “biasa”, “menengah”, dan “khusus”. Ketiga Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) tersebut telah ditetapkan dalam SNI 1726:2019 tentang "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung". Ada beberapa Kategori Desain Sesismik (KDS), yaitu KDS A sampai KDS F.

1. Mutu Beton

Mutu beton merujuk pada kualitas keseluruhan beton struktural yang mencakup kekuatan, durabilitas, kemampuan kerja (*workability*), dan ketahanan terhadap lingkungan. Dalam konteks Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2019 tentang "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung", mutu beton ditentukan terutama oleh parameter teknis seperti kekuatan tekan karakteristik (f'c), yang menjadi dasar desain struktural. Standar ini diadaptasi secara identik dari ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, dengan penyesuaian untuk kondisi lokal Indonesia, seperti iklim tropis dan risiko gempa. Tujuan utamanya adalah memastikan struktur beton aman, stabil, dan tahan lama, dengan persyaratan minimum untuk kekuatan, stabilitas, kemampuan layan, durabilitas, dan integritas.

Tulangan baja yang dikombinasikan dengan beton tersebut yang berfungsi untuk menahan gaya tarik atau lentur. Berdasarkan SNI 2847:2019 tentang “Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung”. Beton bertulang mencakup elemen stuktural yang ditulangi dengan jumlah minimum baja prategang maupun nonprategang.

Secara alamiah, beton sangat kuat dalam menahan gaya tekan. Sifat alami itu membuat beton mampu menahan kombinasi pembebanan seperti beban gravitasi, beban gempa, beban angin, sampai beban hujan. Menjadi pilihan utama untuk merancang struktur bangunan gedung bertingkat tinggi karena sifatnya tersebut dan juga mampu mendistribusikan beban secara ideal dan efisien.

Tabel 1.1
Klasifikasi Kelas Mutu Beton

Klasifikasi Kelas Mutu Beton & Peruntukannya

PEMBAGIAN	KELAS	MUTU K	MUTU FC	KEGUNAAN STRUKTUR
Beton Non Struktural (Kelas I)	B0	K100	fc 8,3 Mpa	LC/ lantai dasar.
	E	K 125	fc12.35 Mpa	LC/ lantai dasar, Jalan lingkungan Kendaraan ringan
	D	K 175	fc 14.53 Mpa	Bangunan ringan, Jalan lingkungan Kendaraan ringan
Beton Struktural (Kelas II)	K 225	K225	fc 18.68 Mpa	Bertingkat 2 lantai, Ruko/ rumah tinggal, Jalan Desa Kendaraan berat Standar
	K 250	K 250	fc 20.75 Mpa	Bertingkat 2 lantai, Ruko/ rumah tinggal Standar
	K 300	K300	fc 24.90 Mpa	Ruko / rumah bertingkat 3 lantai s/d 5 lantai
Beton Prategang (Kelas III)	B	K 350	fc 29.05 Mpa	Lantai dasar bangunan pabrik
	P	K 450	fc 37.35 Mpa	Rigit, Jalan kelas 1 atau Jalan Negara dan Jalan tol
	A	K 500	fc 41.50 Mpa	Precast, Bandara, Kolam renang, Pergudangan, dll

www.multiconjayabeton.com

(Sumber: multiconjayabeton)

Tabel 1.2
Klasifikasi Mutu Beton

Jenis Beton	*fc'* (MPa)	σ_{bk}' (Kg/cm^2)	Uraian
Mutu tinggi	35 – 65	K400 – K800	Umumnya digunakan untuk beton prategang seperti tiang pancang beton prategang, gelagar beton prategang, pelat beton prategang dan sejenisnya.
Mutu sedang	20 – < 35	K250 – <K400	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, kerb beton pracetak, gorong-gorong beton bertulang, bangunan bawah jembatan.
Mutu rendah	15 – <20	K175 – <K250	Umumya digunakan untuk struktur beton tanpa tulangan seperti beton siklop, trotoar dan pasangan batu kosong yang diisi adukan, pasangan batu.
	10 – <15	K125 – <K175	digunakan sebagai lantai kerja, penimbunan kembali dengan beton

(Sumber: Luw Tjun Nji)

2. Riwayat Gempa Northridge

Adapun Gempa Northridge, yang juga dikenal sebagai Gempa Bumi Northridge 1994, merupakan salah satu bencana alam paling merusak dalam sejarah Amerika Serikat. Terjadi pada tanggal 17 Januari 1994, pukul 04:30:55 pagi waktu Pasifik Standar (PST), gempa ini mengguncang wilayah Greater Los Angeles, khususnya Lembah San Fernando di California Selatan. Dengan skala gempa 6,7 SR. Gempa ini disebabkan oleh pecahnya sesar dorong buta (*blind thrust fault*) yang sebelumnya tidak diketahui, bernama Northridge Blind Thrust Fault atau Pico Thrust Fault. Gempa ini bertahan sekitar 8-20 detik, dengan akselerasi puncak tanah melebihi 1,7 g, yang merupakan tertinggi yang pernah direkam secara instrumental di wilayah urban Amerika Utara. Dampaknya dirasakan hingga San Diego, Las Vegas, Phoenix, dan Ensenada di Meksiko, menjadikannya gempa terbesar di wilayah Los Angeles sejak Gempa San Fernando 1971 (juga Mw 6,7). Gempa ini tidak hanya menyebabkan korban jiwa dan kerusakan struktural yang masif, tetapi juga menjadi katalisator perubahan signifikan dalam regulasi bangunan tahan gempa, asuransi, dan penelitian seismik di California.

Gempa Northridge terjadi di wilayah yang sangat rawan seismik, yaitu Cincin Api Pasifik, di mana Lembah San Fernando mengalami kontraksi kerak bumi sekitar 7 mm per tahun akibat sistem sesar dorong dan *thrust fault* yang padat. Episenternya berada di Reseda, sekitar 30 km barat laut pusat kota Los Angeles, dengan hiposenter pada kedalaman sekitar 10 mil (16 km). Sesar yang

pecah menyebar ke atas dan barat laut dengan kecepatan 3 km per detik selama 8 detik.

3. Struktur Beton di Indonesia

Struktur beton merupakan salah satu elemen utama dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia, yang dikenal akan kekuatan, daya tahan, dan fleksibilitasnya dalam berbagai kondisi lingkungan. Di Indonesia, penggunaan beton sangat dominan dalam konstruksi bangunan gedung, jembatan, bendungan, dan infrastruktur lainnya karena sifatnya yang tahan terhadap iklim tropis, beban gempa, dan biaya yang relatif ekonomis. Perkembangan teknologi beton di Indonesia juga dipengaruhi oleh standar nasional seperti Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk beton, yang mengacu pada pedoman internasional seperti ACI (*American Concrete Institute*), namun disesuaikan dengan kondisi lokal seperti risiko gempa dan ketersediaan material.

Penerapan struktur beton di Indonesia tidak lepas dari tantangan, seperti kualitas material lokal, kebutuhan tenaga kerja terampil, dan adaptasi terhadap lingkungan geografis yang beragam, mulai dari daerah rawan gempa hingga wilayah pesisir yang rentan terhadap korosi. Penelitian dan inovasi terus dilakukan untuk meningkatkan performa beton, seperti penggunaan beton bertulang, beton pracetak, dan beton dengan campuran tambahan (*admixture*) untuk meningkatkan kuat tekan dan ketahanan terhadap lingkungan agresif.

Adapun beberapa kelebihan beton bertulang antara lain:

a. Kuat dalam menahan gaya tekan

   Secara alamiah beton sangat kuat dalam menahan gaya tekan. Sifat alami itu membuat beton mampu menahan kombinasi pembebanan seperti beban gravitasi, beban gempa, beban angin, sampai beban hujan. Menjadi pilihan utama untuk merancang struktur bangunan gedung bertingkat tinggi karena sifatnya tersebut dan juga mampu mendistribusikan beban secara ideal dan efisien.

b. Durabilitas yang baik

   Memiliki ketahanan yang baik terhadap api dan air seperti berada dalam suhu yang ekstrem dan juga tingkat kelembaban yang tinggi. Lapisan beton melindungi tulangan baja dari korosi awal, membuatnya cocok untuk berada di lingkungan yang basah ataupun rawa terjadinya kebakaran. Beton juga tahan dalam menahan getaran, yang mana sangat cocok untuk daerah rawan gempa seperti Indonesia.

c. Awet

Beton bertulang memiliki umur yang awet, minimal 50 tahun dengan perawatan yang minimum. Oleh sebab itu, banyak insinyur memilih menggunakan beton bertulang untuk merancang bangunan tingkat tinggi.

d. Ekonomis

Dengan bahan penyusun seperti semen, air, serta agregat halus dan kasar, membuat beton relatif lebih murah dan mudah ditemukan di pasaran. Proses pembuatannya tidak memerlukan kemampuan khusus dari tenaga ahli yang mahal, sehingga biaya keseluruhan lebih rendah jika dibandingkan dengan struktur baja.

e. Fleksibel

Memiliki sifat yang fleksibel, terutama dengan desain arsitektur yang kompleks, seperti lengkungan yang tajam dan bentang yang panjang, membuat beton menjadi populer ditambah dengan beton bisa langsung dicor di tempat (*cast in situ*).

f. Ramah lingkungan

Sifatnya yang juga ramah lingkungan sehingga dapat didaur ulang menggunakan bahan tambahan (*admixture modern*) untuk mengurangi emisi karbon selama proses produksi. Struktur beton juga memiliki sifat yang dapat mengisolasi suara dan termal yang baik sehingga meningkatkan kenyamanan dan keamanan penghuni.

Adapun beberapa kekurangan beton bertulang antara lain:

a. Lemah tarik

Beton murni lemah terhadap menahan gaya tarik. Maka dari itu, diperlukan struktur tambahan berupa tulangan baja/besi beton untuk menahan gaya tarik maupun lentur. Perhitungan untuk menambah tulangan baja memerlukan analisis sesuai dengan standar yang berlaku di Indonesia. Jika hasil analisis “tidak aman”, maka beton bertulang berisiko gagal bahkan hancur.

b. *Self weight* yang besar

Beton bertulang memiliki massa jenis sekitar 2,4 ton/m3, yang mana angka tersebut bisa sangat besar, terutama beton yang memiliki bentuk atau luas penampang yang besar juga. Hal tersebut berdampak kepada makin besarnya *dead load* dari sebuah bangunan dan *dead load* tersebut juga masih harus dikalikan faktor 1,2.

c. Waktu konstruksi yang lama

Terutama pada proses pengecoran yang mana bisa memerlukan waktu lama (tergantung luasan yang dicor), juga memerlukan bekisting yang banyak ditambah lagi beton harus memiliki umur minimal 28 hari untuk mencapai kuat tekan rencana sehingga membuat proyek konstruksi memerlukan waktu yang lama.

d. Sulit untuk dimodifikasi

Saat beton mengeras, akan sulit untuk melakukan suatu modifikasi (jika ada perubahan pada rencana awal). Hal itu membuat beton harus dibobok, atau bahkan dibongkar dan memiliki risiko kerusakan yang signifikan

B. Desain Seismik Rangka Pemikul Momen Khusus dan Dinding Geser

Desain seismik merupakan aspek kritis dalam perencanaan struktur bangunan di Indonesia, mengingat negara ini terletak di wilayah Cincin Api Pasifik yang rawan gempa. Dua sistem struktur utama yang sering digunakan dalam desain tahan gempa adalah Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan Dinding Geser (*Shear Wall*). Kedua sistem ini dirancang untuk menahan beban gempa dengan memanfaatkan kekakuan, daktilitas, dan kapasitas disipasi energi yang berbeda, sesuai dengan karakteristik bangunan dan kondisi geologis setempat. Penjelasan berikut membahas prinsip desain, karakteristik, serta penerapan kedua sistem ini berdasarkan standar yang berlaku di Indonesia.

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dirancang khusus untuk menahan momen lentur dan gaya geser melalui sambungan kaku antara balok dan kolom, memungkinkan deformasi plastis yang terkendali untuk mendisipasi energi gempa tanpa kegagalan mendadak. Sistem ini telah menjadi standar umum di Indonesia sejak pengembangan kode seismik pada awal 2000-an, di mana penekanan pada daktilitas tinggi dan konsep "*strong column weak beam*" menjadi kunci untuk mencegah keruntuhan progresif. Penelitian terkini menunjukkan bahwa SRPMK efektif untuk bangunan menengah hingga tinggi di daerah seismik sedang seperti Jakarta, di mana kategori desain seismik D sering diterapkan, meskipun memerlukan perincian tulangan yang teliti untuk menghindari kerapuhan. Kombinasi dengan elemen lain, seperti dinding geser, sering digunakan untuk meningkatkan kekakuan lateral, terutama pada struktur tinggi yang rentan terhadap simpangan berlebih akibat gempa.

Dinding geser, di sisi lain, berfungsi sebagai elemen vertikal yang kaku untuk menahan gaya lateral, mengurangi simpangan (*drift*) antar lantai dan mencegah kerusakan nonstruktural selama gempa. Di Indonesia, sistem ini semakin populer

untuk bangunan tinggi, di mana integrasi dengan SRPMK dan *shear wall* membentuk sistem ganda yang optimal, seperti pada desain *core wall* dengan *moment frames*. Tantangan utama termasuk adaptasi terhadap tanah lunak di wilayah pesisir dan kebutuhan fondasi yang kuat untuk menahan momen jungkir, yang telah diatasi melalui inovasi seperti penggunaan beton berkinerja tinggi dan analisis dinamis. Standar seperti SNI 2847:2019 menekankan detailing khusus untuk dinding geser agar mencapai daktilitas yang diperlukan, sementara penelitian global mendukung penerapannya untuk meningkatkan performa seismik secara keseluruhan.

Gambar 1.1 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus

Gambar 1.2 Dinding Geser

1. Perilaku Rangka Pemikul Momen

Menurut SNI 1726:2019, Rangka Pemikul Momen (*Moment Resisting Frame*) adalah sistem struktur rangka yang terdiri dari elemen-elemen seperti balok dan kolom yang dihubungkan secara kaku, dirancang untuk menahan beban lateral seperti gempa melalui mekanisme lentur, geser, dan aksial. Sistem ini dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan tingkat daktilitas dan kategori desain seismik: Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk daktilitas tinggi di wilayah gempa tinggi (nilai faktor respons seismik R=8), Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) untuk daktilitas sedang (R=5), dan Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB) untuk daktilitas rendah (R=3) dan bisa disesuaikan dengan Kategori Desain Seismik (KDS). Perilaku keseluruhan sistem ini bergantung pada kemampuan sambungan kaku untuk mentransfer momen, sehingga memungkinkan struktur menyerap energi gempa tanpa keruntuhan prematur, dengan fokus pada reduksi respons spektrum gempa untuk desain ekonomis.

Tabel 1.3
Koefisien untuk SRPMK dan Dinding Geser

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R[a]	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0[b]	Faktor pembesaran defleksi, C_d[c]	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)[d]				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D[e]	E[e]	F[f]
19.Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20.Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
21.Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
22.Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23.Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24.Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25.Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26.Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10[k]	TI[k]	TI[k]
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI[l]	TI[l]	TI[l]
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus[m]	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10.Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11.Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12.Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan[n]	3½	3[o]	3½	10	10	10	10	10
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus[g,h]	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa[g]	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: Tabel 12 SNI 1726:2019)

Perilaku seismik Rangka Pemikul Momen, khususnya SRPMK, dirancang untuk menunjukkan daktilitas tinggi, yaitu kemampuan struktur mengalami deformasi plastis berulang tanpa kehilangan kapasitas beban secara signifikan. Di bawah beban gempa, sistem ini memanfaatkan pembentukan sendi plastis terutama pada balok, sementara kolom tetap elastis atau mengalami deformasi minimal, sesuai konsep "*strong column-weak beam*" yang mencegah keruntuhan kolom dan progresif *collapse*. SNI 1726:2019 menekankan bahwa perilaku ini dicapai melalui reduksi gaya gempa nominal hingga 1/8 dari gaya elastis, dengan energi sisanya diserap melalui deformasi inelastis, sehingga struktur dapat kembali ke posisi semula atau minimal tetap berdiri setelah guncangan kuat.

Prinsip desain perilaku Rangka Pemikul Momen dalam SNI 1726:2019 melibatkan analisis spektrum respons dan verifikasi kinerja seismik, di mana struktur harus memenuhi batas simpangan antar lantai (*drift*) untuk mencegah kerusakan nonstruktural. Untuk SRPMK, persyaratan detailing ketat seperti jarak sengkang minimum pada kolom dan balok, serta penguatan sambungan, memastikan perilaku daktil dengan indeks kerusakan rendah selama analisis dinamis riwayat waktu. Standar ini juga mengintegrasikan peta gempa 2017, yang meningkatkan gaya geser seismik hingga 27% dibandingkan versi sebelumnya, sehingga memengaruhi perilaku struktur dengan peningkatan kekakuan lateral dan kapasitas disipasi energi.

Penerapan Rangka Pemikul Momen di Indonesia, sesuai SNI 1726:2019, sering dikombinasikan dengan sistem lain seperti dinding geser untuk bangunan tinggi di wilayah rawan gempa seperti Yogyakarta atau Palu, di mana perilaku struktur dievaluasi melalui perangkat lunak seperti ETABS untuk memastikan kesesuaian dengan kategori situs tanah (lunak, sedang, keras). Tantangan termasuk adaptasi terhadap peningkatan intensitas gempa, memerlukan evaluasi ulang desain *existing* untuk memenuhi standar baru, dengan fokus pada perilaku pasca-elastis yang aman dan ekonomis. Inovasi seperti penggunaan *reduced beam section* pada rangka baja juga diadaptasi untuk meningkatkan perilaku seismik, memastikan struktur tetap aman meskipun deformasi signifikan.

2. Analisis Rangka Pemikul Momen

Rangka pemikul momen (*moment-resisting frame*) adalah sistem struktural pada bangunan beton bertulang yang dirancang untuk menahan beban lateral, terutama gempa, melalui mekanisme lentur, geser, dan aksial pada balok, kolom, dan sambungan. Sistem ini dibagi menjadi tiga tingkatan: Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), dan Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), dengan SRPMK sebagai yang paling daktail dan cocok untuk wilayah gempa tinggi (seperti zona 5-6 di Indonesia). Analisis rangka pemikul momen mengintegrasikan perhitungan beban gempa dari SNI 1726-2019 dengan desain elemen beton dari SNI 2847-2019, menggunakan

metode kekuatan batas (*ultimate strength design*) untuk memastikan keamanan, daktilitas, dan ekonomi struktur.

3. Desain Sambungan Balok-Kolom dan Konstruksinya

Sambungan balok-kolom didefinisikan sebagai bagian dari kolom dengan kedalaman balok terdalam terhadap kolom. Oleh karena itu, maka istilah sendi digunakan mengacu pada sambungan balok-kolom. Sambungan adalah gabungan antara kolom, balok, dan pelat yang berdekatan dengan sendi. Sebuah balok yang melintang merupakan salah satu *frame* ruang berada dalam sendi dengan arah yang tegak lurus dengan arah geser yang sedang diperhitungkan. Dalam desain gedung bertingkat, kolom akan bertemu dengan balok. Daerah pertemuan itu merupakan sambungan. Sambungan sering kali menjadi bagian terlemah dari sistem struktur.

Berdasarkan konsep desain kapasitas, diharapkan sambungan berperilaku *ductile* terhadap beban yang besar, seperti gempa. Perilaku yang diharapkan dari sambungan balok kolom adalah *ductile* dengan respons inelastik pada saat mengalami beban gempa kuat. Ada banyak cara yang mungkin ditempuh untuk menentukan jenis pembebanan dan kombinasinya. Identifikasi yang tepat pada masalah ini menjadi kunci sukses untuk menentukan detail sambungan. Kebutuhan dasar untuk performa sambungan menurut Park dan Paulay (1975) adalah sebagai berikut:

a. Sambungan menunjukkan performa beban layan sama dengan kualitas elemen yang disambung;
b. Sambungan memiliki kekuatan yang paling tidak berhubungan dengan kombinasi beban merugikan yang dapat didukung oleh elemen yang disambung;
c. Kekuatan sambungan tidak menentukan kekuatan struktur dan perilakunya tidak menghalangi pengembangan kekuatan penuh elemen yang disambung; dan
d. Mudah dibuat dan memiliki akses untuk menempatkan dan memadatkan beton.

Untuk mencapai kondisi struktur yang daktail, maka perlu dijaga kegagalan pada struktur beton agar tidak terjadi dengan mudah kegagalan geser dan kegagalan tekan yang bersifat getas. Kegagalan ini terjadi pada titik pertemuan antara balok dan kolom. Beton memiliki kuat tekan yang relatif tinggi dibandingkan dengan bahan-bahan lain, tetapi kuat tariknya sangat rendah, sehingga memerlukan tulangan tarik. Tulangan tarik untuk beton bertulang menggunakan serat yang terbuat dari baja, plastik, kaca, dan lain-lain. Baja merupakan material yang paling sering digunakan sebagai serat tulangan. Sifatnya yang mudah terkena korosi menyebabkan kekuatan beton bertulang berkurang,

namun baja ditanam pada beton, sehingga selimut beton akan melindungi baja dari kemungkinan korosi.

Ada dua jenis tulangan yang digunakan pada sambungan kolom-balok, yaitu tulangan longitudinal balok dan tulangan *transversal joint*. Gaya pada tulangan longitudinal di muka sambungan ditentukan dengan menganggap bahwa tegangan pada tulangan lentur 1,25fy. Tulangan yang berhenti pada sebuah kolom harus dilanjutkan sampai sisi terjauh dari inti kolom terkekang dan diangkur. Tulangan longitudinal balok yang diteruskan sampai melewati sambungan, dimensi kolom pada arah sejajar tulangan tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan terbesar balok untuk beton normal (SNI 2847:2019).

Bila tulangan momen negatif balok menggunakan tulangan berkepala (*headed deformed bar*) yang berhenti di dalam *joint*, maka ujung atas kolom harus diteruskan di atas *joint* setidaknya setinggi h. Sebagai alternatif, tulangan balok harus dikekang pada muka atas *joint* oleh tulangan *joint* vertikal tambahan.

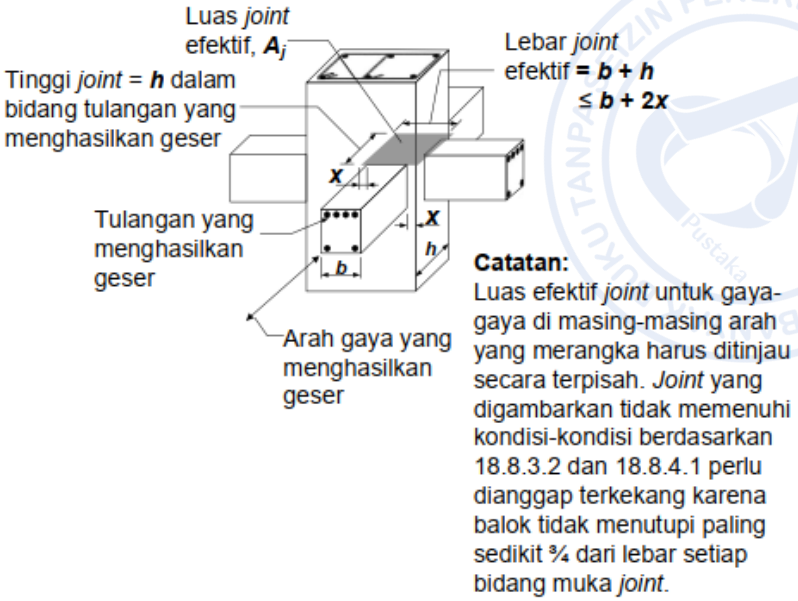
Kuat geser nominal (Vn *joint*) harus memenuhi tabel di bawah:

Tabel 1.4
Kuat Geser Nominal pada *Joint* (Vn *Joint*)

Konfigurasi *Joint*	V_n
Untuk *joint* yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya [1]	$1,7\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]
Untuk *joint* yang terkekang oleh balok-balok pada tiga sisinya atau dua sisi berlawanan[1]	$1,2\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]
Untuk kasus-kasus lainnya	$1,0\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]

[1]Mengacu pada 18.8.4.2

(Sumber: Pasal 18.8.4.1 SNI 1726:2019)



Gambar 1.3 Kuat Geser Nominal Pada *Joint* (Vn *Joint*)
(Sumber: Pasal 18.8.4.1 SNI 1726:2019)

Berikut ini kategori klasifikasi sambungan pada balok-kolom berdasarkan pada kondisi pertemuan koneksi dan deformasi yang diantisipasi dari anggota *frame* ketika melawan beban lateral

a. Tipe 1. Sambungan yang terdiri dari anggota *frame* yang dirancang untuk memenuhi syarat pada ACI 318-02, tetapi tidak termasuk pada bagian yang tanpa deformasi inelastik; dan
b. Tipe 2. Anggota *frame* yang dirancang untuk memiliki kekuatan berkelanjutan di bawah deformasi pembalikan ke kisaran inelastik. Persyaratan untuk sambungan tergantung pada anggota yang terdeformasi pada bagian sendi, tersirat oleh desain kondisi beban. Sambungan tipe ini adalah sambungan yang memiliki bagian yang diperlukan untuk mengurangi energi melalui pembalikan deformasi ke jangkauan inelastik yang dirancang sesuai ACI 318-02.

Berdasarkan model sambungan yang direncanakan dalam menahan beban mulai dari kondisi elastik hingga inelastik, maka sambungan dibedakan menjadi:

a. Elastis dan inelastis

Sambungan sedapat mungkin diusahakan dalam keadaan elastis. Sendi plastis balok diperkirakan terjadi pada muka balok apabila struktur dilanda gempa. Setelah beberapa kali terjadi siklus deformasi inelastis pada balok, maka tidak dapat dihindarkan deformasi juga akan terjadi pada sambungan balok-kolom. Hal ini disebabkan karena adanya penetrasi regangan leleh pada

baja tulangan balok yang melintas pada sambungan balok kolom khususnya apabila baja tulangan mencapai "perkuatan regangan" (*strain hardening*) pada sendi plastis yang berbatasan dengan muka kolom dan diklasifikasi sebagai sambungan balok kolom yang "inelastis". Jika deformasi inelastis tidak terjadi pada balok dan kolom yang berbatasan dengan sambungan balok–kolom dan memiliki tulangan yang cukup, maka diklasifikasikan sebagai sambungan balok-kolom yang "elastis".

b. Khusus

Pada sambungan balok-kolom ini dibutuhkan tulangan yang rapat, namun sering menimbulkan kesulitan dalam pelaksanaannya, terutama pada sambungan balok-kolom sebelah dalam (interior) yang dilintasi oleh tiga jurusan tulangan serta penjangkaran pada sambungan portal tepi dan sambungan pada balok–kolom bagian pojok (*exterior*). Pembesaran balok (*voute*) dalam arah horizontal pada sekeliling sambungan balok–kolom dengan penerusan sebagian balok pada portal tepi dari kolom balok bagian pojok dilakukan untuk mengatasi hal itu.

Konstruksi penulangan sambungan balok-kolom beton adalah desain yang mempertemukan balok dan kolom dengan penempatan tulangan yang saling terhubung dan tertanam kuat untuk menyalurkan beban, menekankan panjang penyaluran yang memadai (penyaluran tulangan), dan penggunaan sengkang (tulangan transversal) dengan jarak yang rapat di zona sambungan untuk menahan geser dan deformasi. Detail penulangan harus mengikuti standar beton bertulang seperti SNI, dengan mengintegrasikan tulangan balok ke dalam kolom dan atau menggunakan sambungan yang kokoh seperti kaitan 90° atau sambungan lewatan sesuai perhitungan desain.

Gambar 1.4 Konstruksi Sambungan Balok-Kolom

BAB 2

PEMODELAN STRUKTUR

PENERBIT DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN Pustaka

A. Data Umum Bangunan

Pada buku ini akan diberikan contoh langsung pemodelan struktur bangunan gedung 26 lantai yang berfungsi sebagai kantor arsip.

Berikut adalah data umum bangunan:

a. Nama proyek : Gedung Kantor 26 Lantai
b. Lokasi proyek : DKI Jakarta
c. Panjang bangunan : 40 meter
d. Lebar bangunan : 40 meter
e. Jarak antar kolom : 8 meter
f. Luas bangunan : xxx m^2
g. Jumlah lantai : 26
h. Fungsi : Kantor Arsip
i. Sistem struktur : Dinding Geser Beton Bertulang Khusus

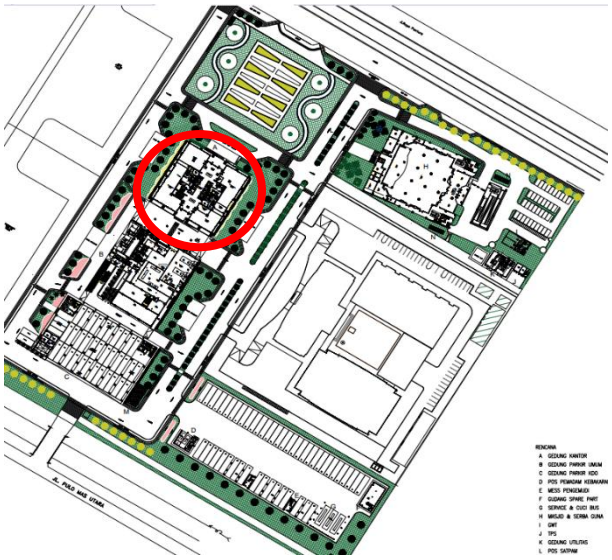
Data-data di atas adalah informasi umum dalam merancang gedung kantor yang harus mampu menahan beban gravitasi, beban angin, beban hujan, sampai beban gempa. Untuk merancang struktur bangunan *high rise* ini, penulis menggunakan sebuah *software* yang memang dikhususkan untuk menganalisis bangunan gedung, yaitu ETABS.

Gambar 2.1 *Software* ETABS

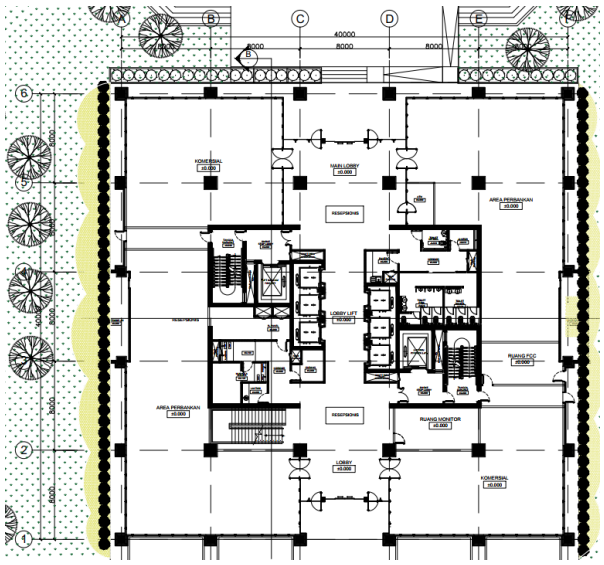
B. Pembuatan Grid

Sebelum membuat sebuah *grid*/AS dari gedung kantor 26 lantai tersebut, ada baiknya kita mengetahui bagaimana *site plan*/tata letak bangunannya. Gunanya adalah agar kita mengetahui di mana saja letak bangunan-bangunan yang ada di *site plan* ini.

Akan tetapi, di buku ini hanya membahas langkah demi langkah bagaimana cara merancang gedung kantor 26 lantai ini dan mengabaikan tata letak bangunan lain. *Site plan* bisa dilihat di bawah ini.

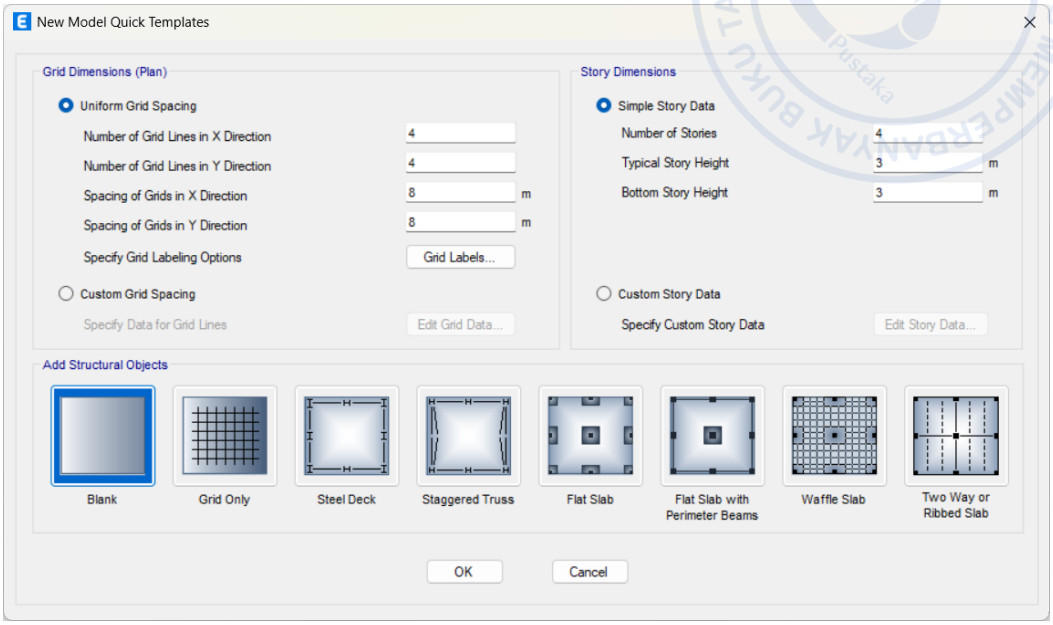


Gambar 2.2 *Site Plan* Kawasan Gedung Kantor

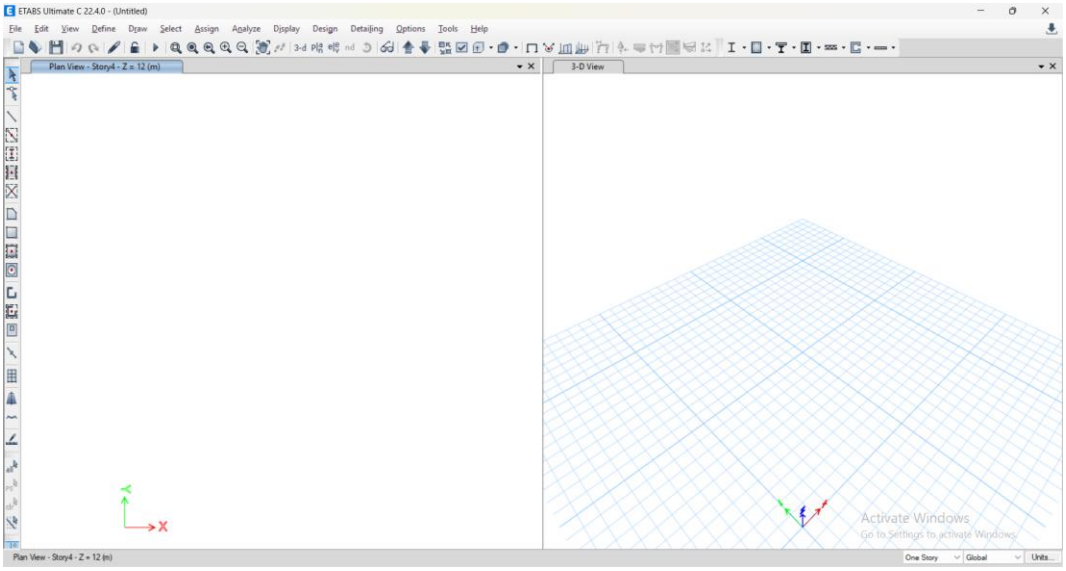


Gambar 2.3 Denah Arsitektur Gedung Kantor

Pada menu *New Model Quick Template*, pilih opsi *Blank*. Selain itu, juga terdapat beberapa pilihan lain yang bisa digunakan dalam membuat *grid*. Akan tetapi, pada buku ini penulis memilih yang opsi *Blank*.

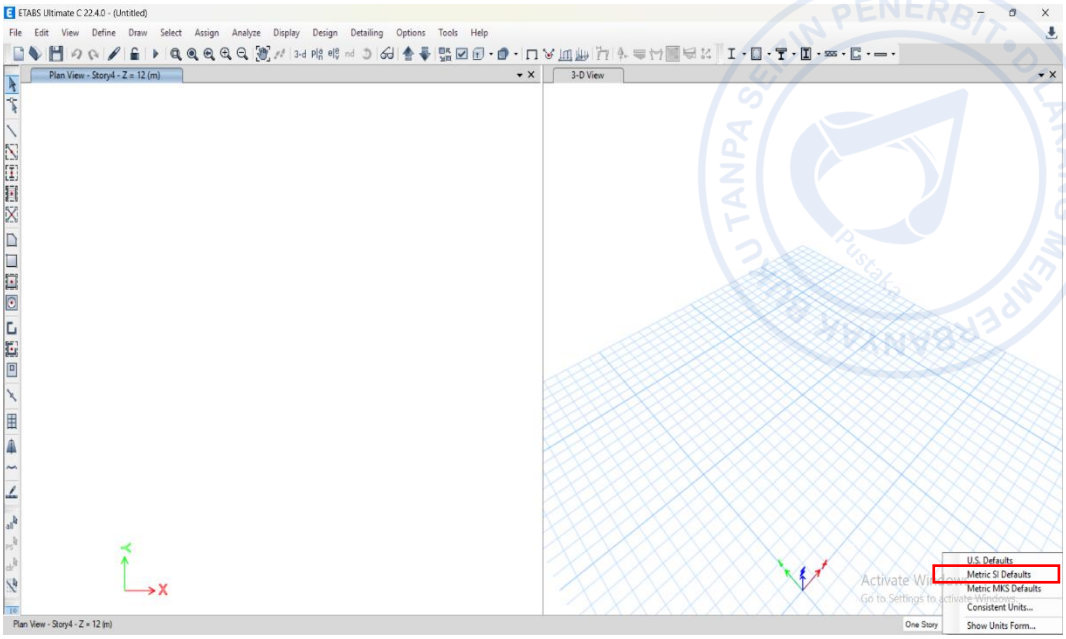


Gambar 2.4 Opsi Grid pada *Software* ETABS



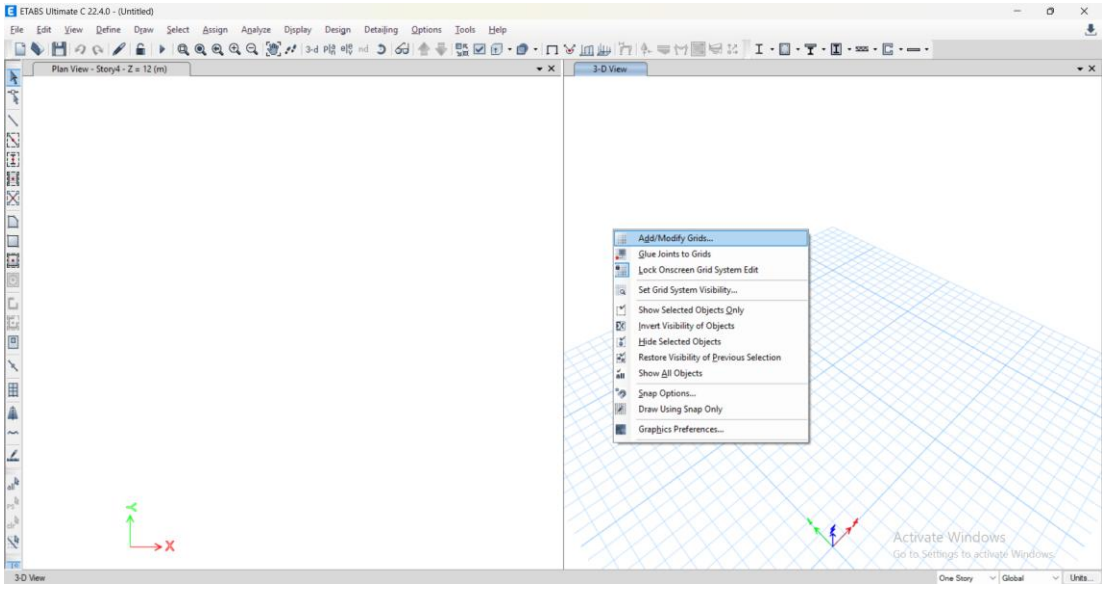
Gambar 2.5 Tampilan Awal Model Pada ETABS

Untuk memudahkan pemodelan dan menganalisis struktur gedung yang akan kita rancang, maka terlebih dahulu kita mengubah satuan pada *software* ETABS yang digunakan. Di sini penulis menggunakan satuan *Metric S.I Defaults*.

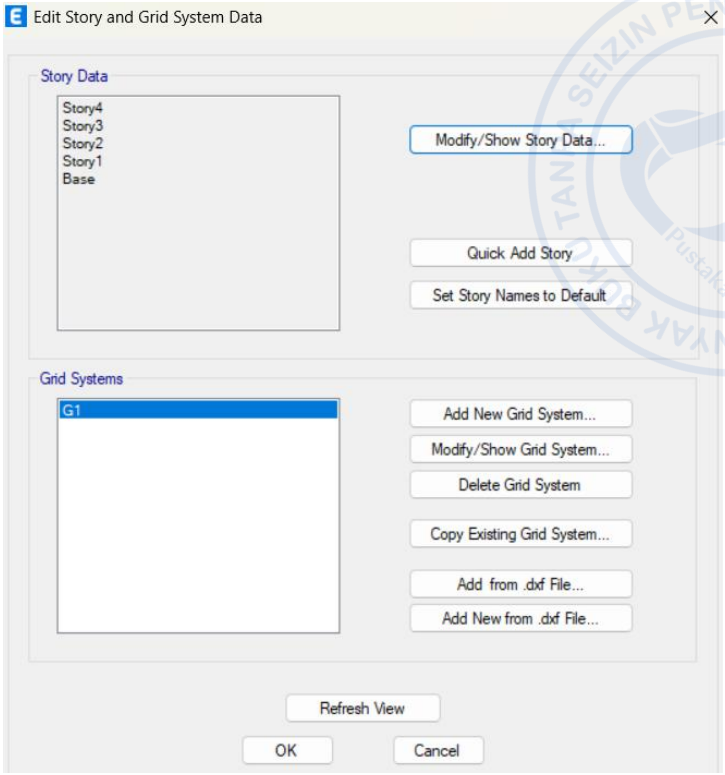


Gambar 2.6 Menyesuaikan Penggunaan Satuan

Yang dilakukan selanjutnya adalah membuat *grid* pada arah X dan arah Y, dan juga membuat jarak antar tingkatnya.



Gambar 2.7 Tahap Selanjutnya dalam Membuat *Grid*

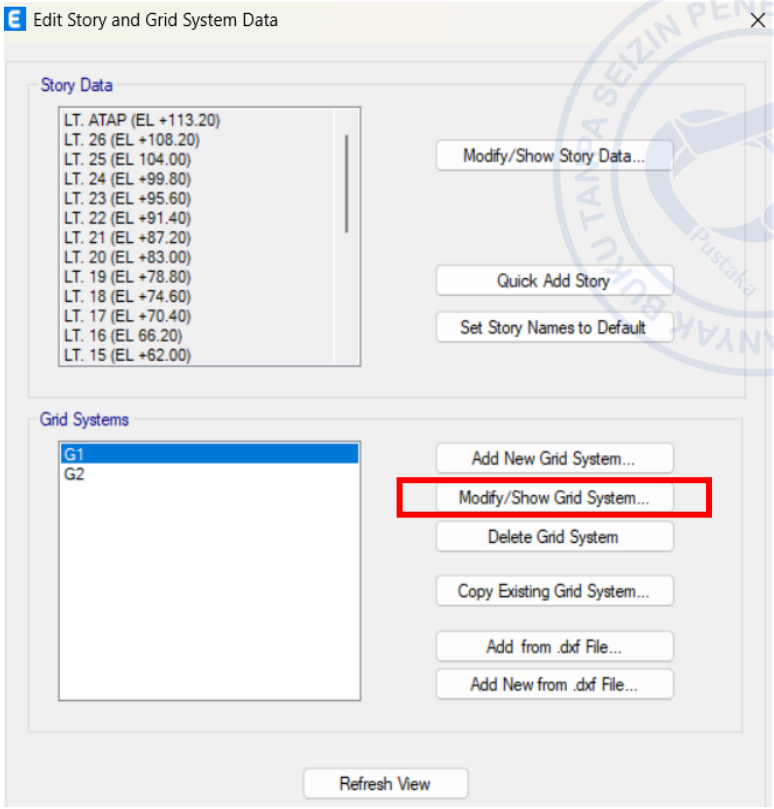


Gambar 2.8 *Edit Story and Grid System Data*

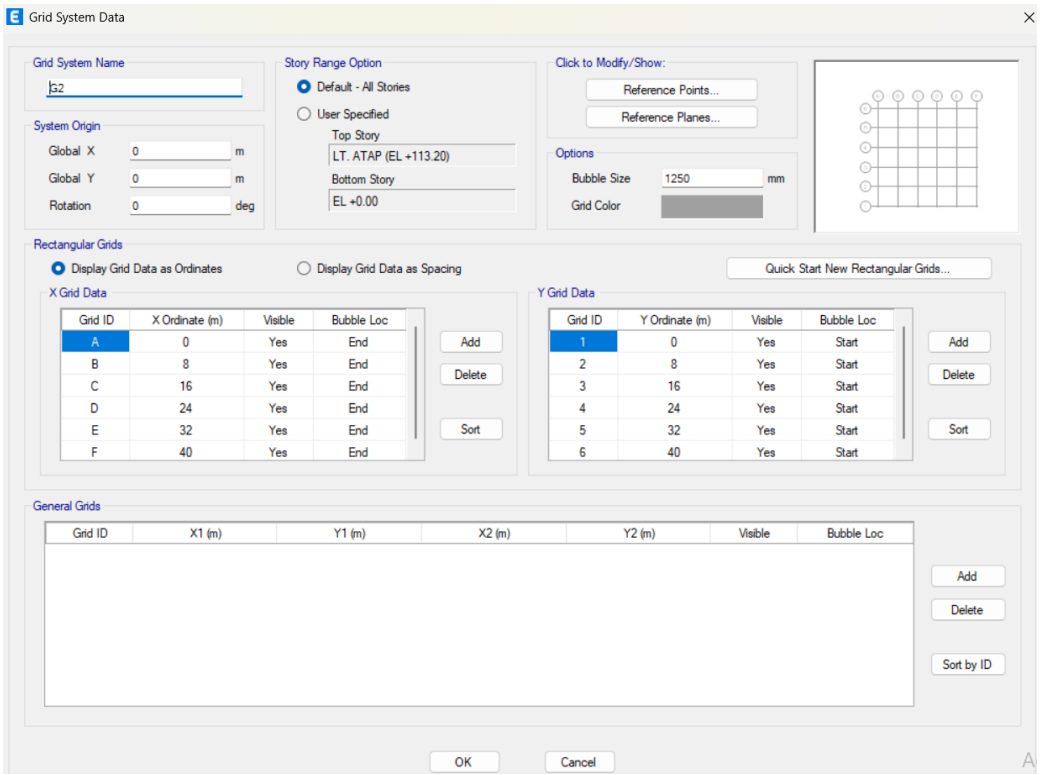
Ada dua cara untuk menambahkan/mengedit *grid* baik arah X maupun arah Y:

- Memasukkan sesuai dengan ordinat; dan
- Memasukkan jarak antar AS.

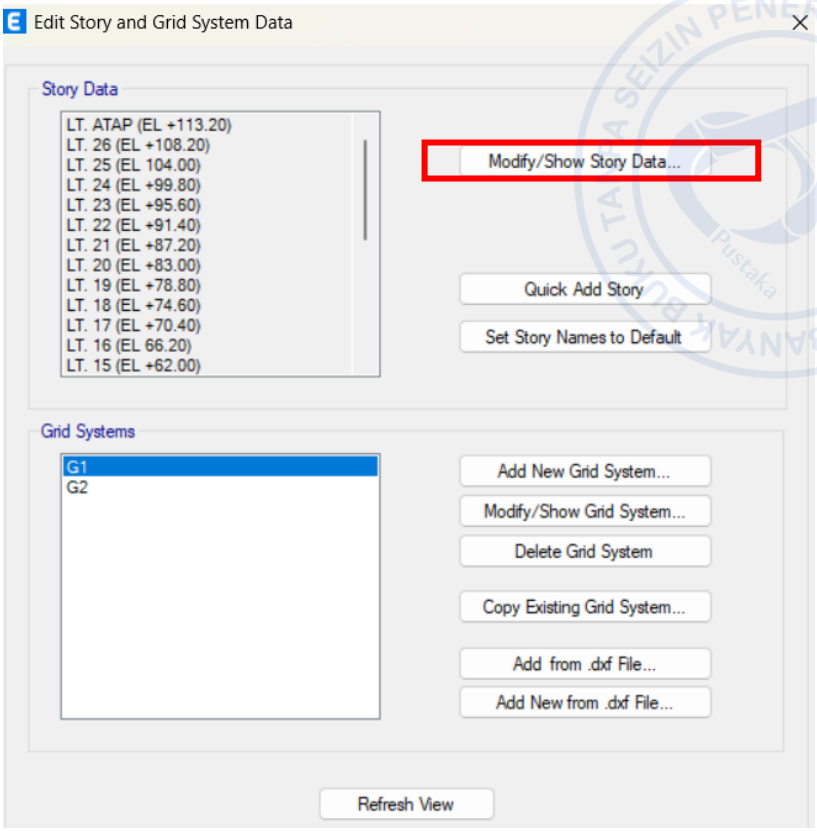
Di sini, penulis memilih cara yang kedua, yaitu memasukkan jarak antar AS. Bangunan kantor 26 lantai ini memiliki ukuran yang relatif sederhana, yaitu 40 meter x 40 meter dengan jarak antar kolom utama 8 meter.



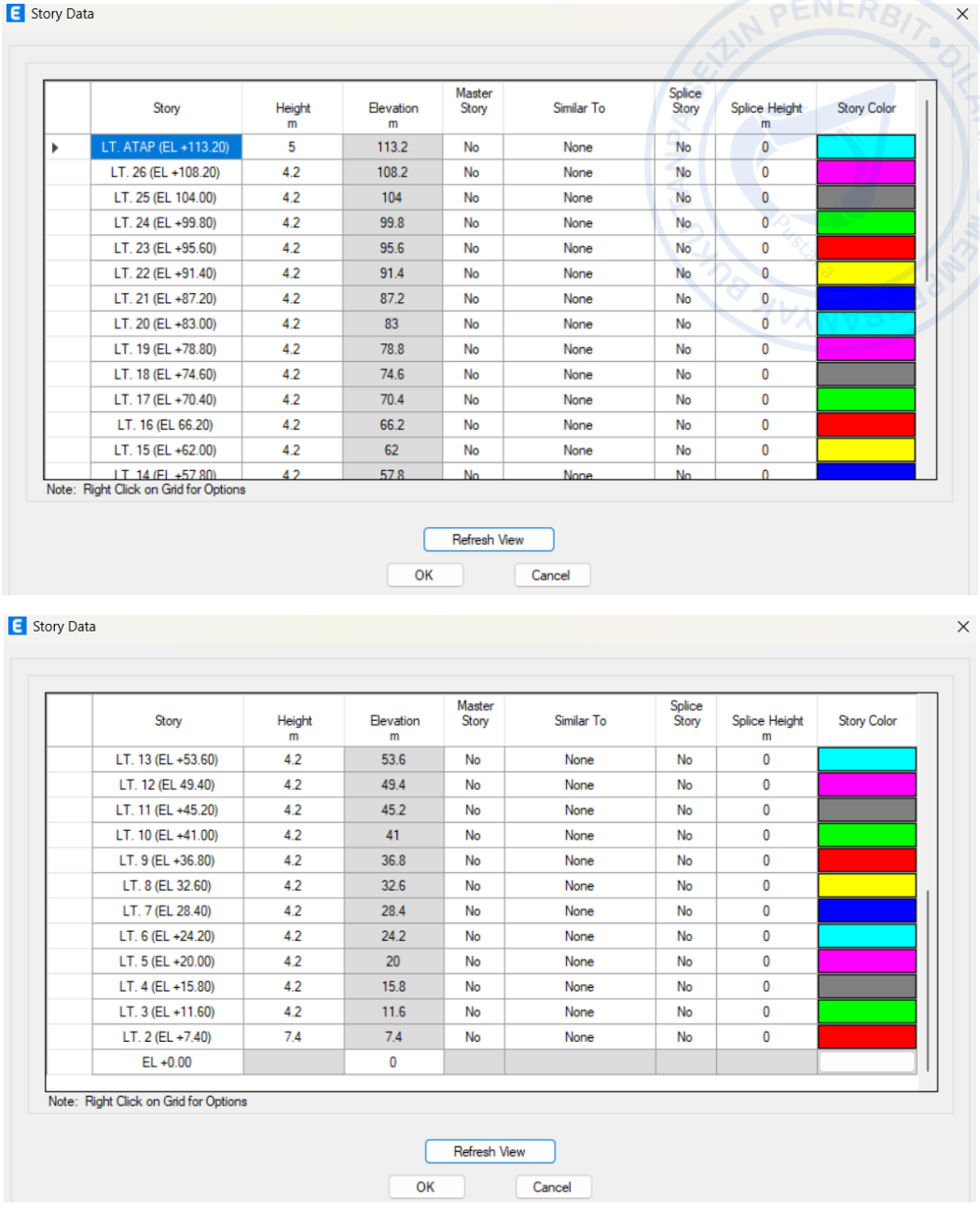
Gambar 2.9 *Modify/Show Grid System*



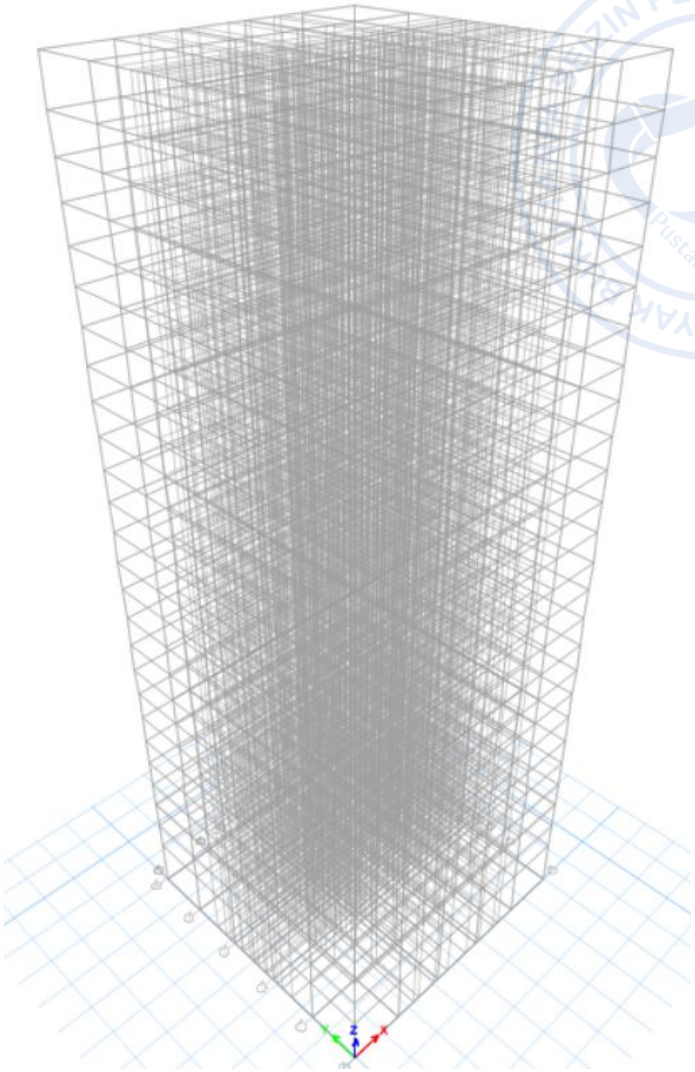
Gambar 2.10 *Edit Grid System*



Gambar 2.11 *Modify/Show Story Data*



Gambar 2.12 *Story Data*



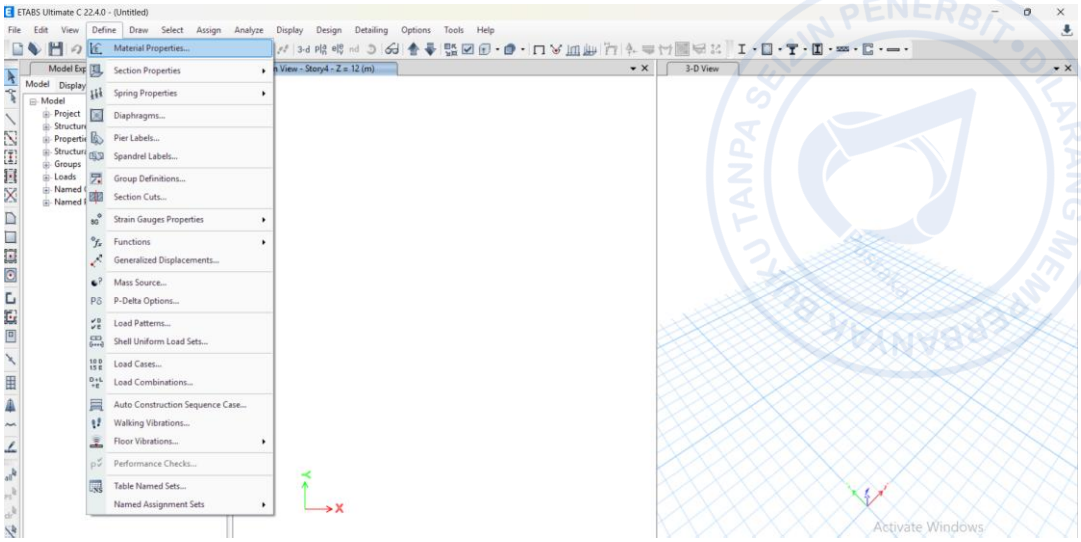
Gambar 2.13 *Grid* yang Telah Dibuat

C. Pembuatan Properti Material

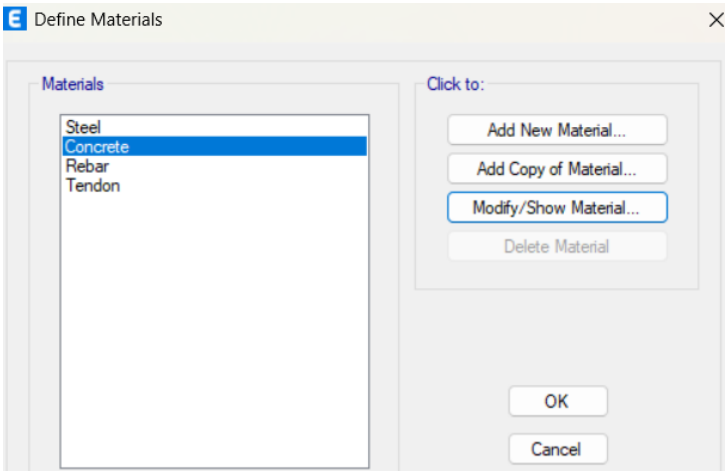
Setelah kita membuat *grid* bangunan, maka selanjutnya adalah menentukan properti material yang akan digunakan untuk merancang struktur gedung 26 lantai ini. Material yang digunakan di antaranya:

1. Beton
2. Tulangan baja

Cara membuat properti material tersebut di atas adalah dengan memilih menu *Define*, piliih opsi *Material Properties*.



Gambar 2.14 *Define Material Properties*



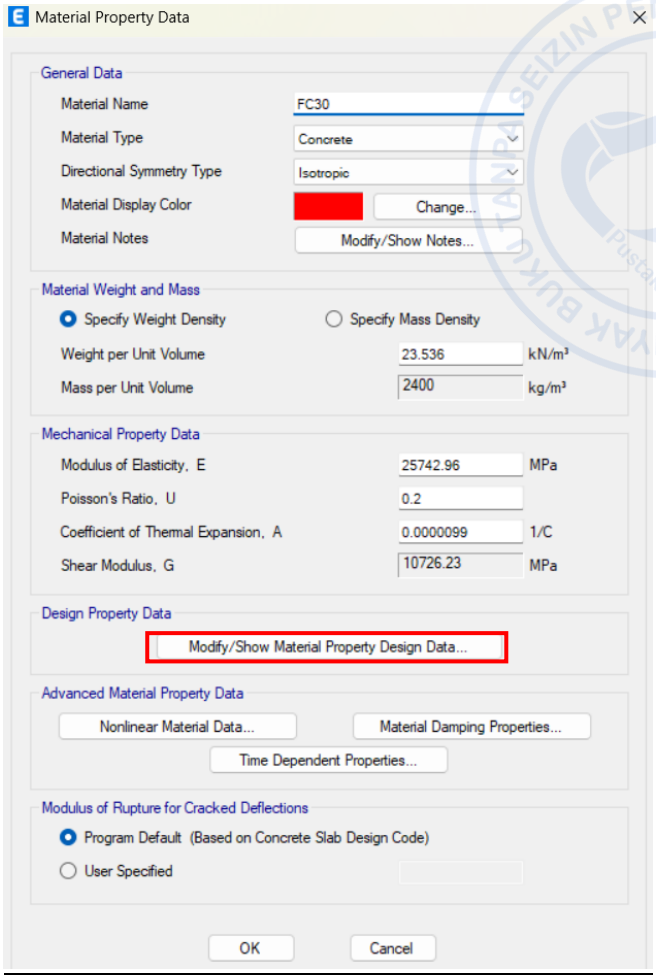
Gambar 2.15 Define Materials

Adapun penentuan properti material yang akan dirancang harus mengikuti ketentuan di bawah.

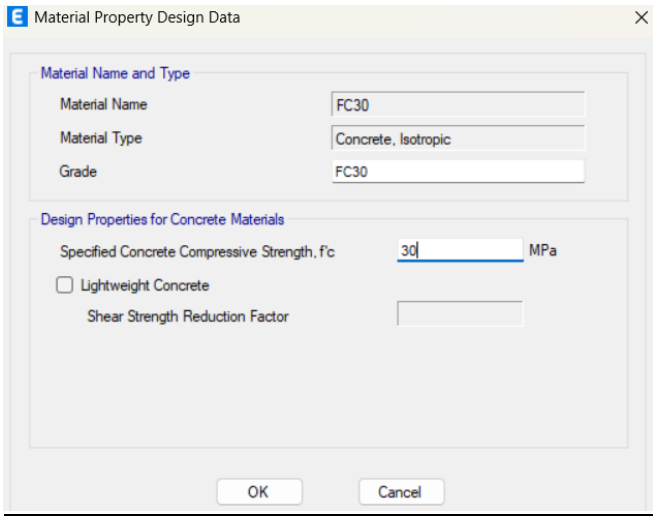
1. Beton bertulang

   Data:

   Kuat tekan (fc') = 30 MPa
   Massa jenis = 23.536 kN/m^3
   Modulus elastisitas = 4700*√fc' = 25.742, 96 MPa
   Angka poison (μ) = 0,2



Gambar 2.16 *Concrete Material Property Data*



Gambar 2.17 *Concrete Material Property Design Data*

2. Tulangan baja

Berdasarkan SNI 2847:2019, spesifikasi material baja tulangan memenuhi persyaratan pasal 20.2.5 adalah baja tulangan kelas BJTS 420B. Spesifikasi teknis dari baja tulangan kelas BJTS 420B dapat diketahui berdasarkan Tabel 6 SNI 2052:2017 di bawah.

Tabel 2.1
Sifat Mekanis Tulangan Baja

Kelas baja tulangan	Uji tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
	Kuat luluh/leleh (YS)	kuat tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.	sudut lengkung	diameter pelengkung	
	MPa	MPa	%		mm	
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 (d ≤ 10 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	-
			12 (d ≥12 mm)	180°	5d (d ≥ 19 mm)	
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 (d ≤ 10 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
			12 (d ≥13 mm)	180°	5d (d ≥ 19 mm)	
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	9 (d ≤ 19 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
			8 (22 ≤ d ≤ 25 mm)	180°	5d (19 ≤ d ≤ 25 mm)	
			7 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	14 (d ≤ 19 mm)	180°	3,5d (d ≤ 16 mm)	Min. 1,25
			12 (22 ≤ d ≤36 mm)	180°	5d (19 ≤ d ≤ 25 mm)	
			10 (d > 36 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,25
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,25
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	
BjTS 700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805	7 (d ≤ 25 mm)	180°	5d (d ≤ 25 mm)	Min. 1,15
			6 (d ≥ 29 mm)	180°	7d (29 ≤ d ≤ 36 mm)	
				90°	9d (d > 36 mm)	

Keterangan:
1. d adalah diameter nominal baja tulangan beton
2. hasil uji lengkung tidak boleh menunjukan retak pada sisi luar lengkungan benda uji lengkung

(Sumber: SNI 2052:2017)

Tabel di atas adalah acuan penulis yang selanjutnya akan mendefinisikan tulangan baja pada *software* ETABS.

Data:

Mutu tulangan baja = BJTD 420B
Massa jenis = 78,5 kN/m^3
Modulus elastisitas = 200.000 MPa

Tegangan leleh (fy) = 420 MPa
Tegangan putus (fu) = 525 MPa
Fye = 1,25*420 MPa = 525 MPa
Fue = 1,25*545 MPa = 656,25 MPa

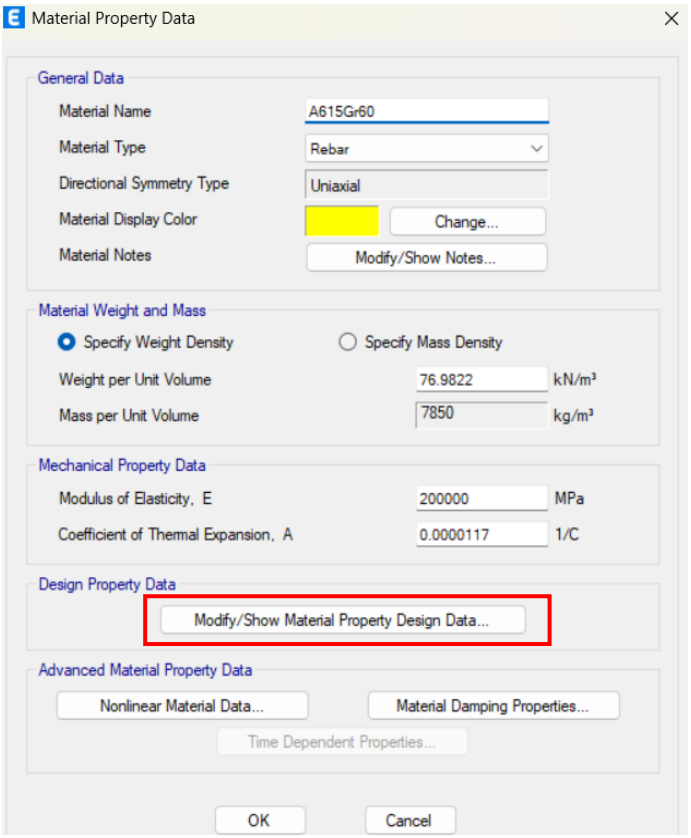
Untuk tegangan leleh yang diharapkan (fye) dan tegangan putus yang diharapkan (fue) itu harus ditentukan sesuai faktor pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.2
Faktor untuk Menentukan Fye dan Fue Tulangan Baja

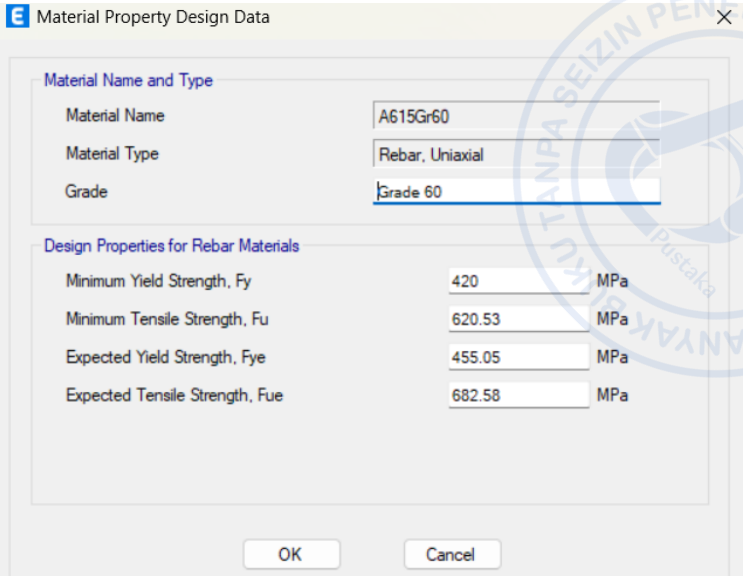
Table 6-4 Factors to Translate Lower Bound Material Properties to Expected Strength Material Properties

Material Property	Factor
Concrete Compressive Strength	1.50
Reinforcing Steel Tensile & Yield Strength	1.25
Connector Steel Yield Strength	1.50

(Sumber: FEMA 356)



Gambar 2.18 *Rebar Material Property Data*



Gambar 2.19 *Rebar Material Property Design Data*

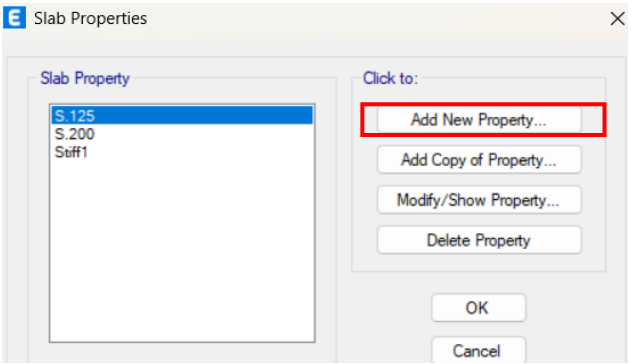
D. Pembuatan Properti Penampang

Dalam merancang suatu bangunan, pastilah kita harus menentukan/membuat beberapa penampang seperti penampang pelat, balok dan kolom. Adapun beberapa ukuran penampang beton yang digunakan penulis dalam merancang gedung kantor 26 lantai adalah sebagai berikut:

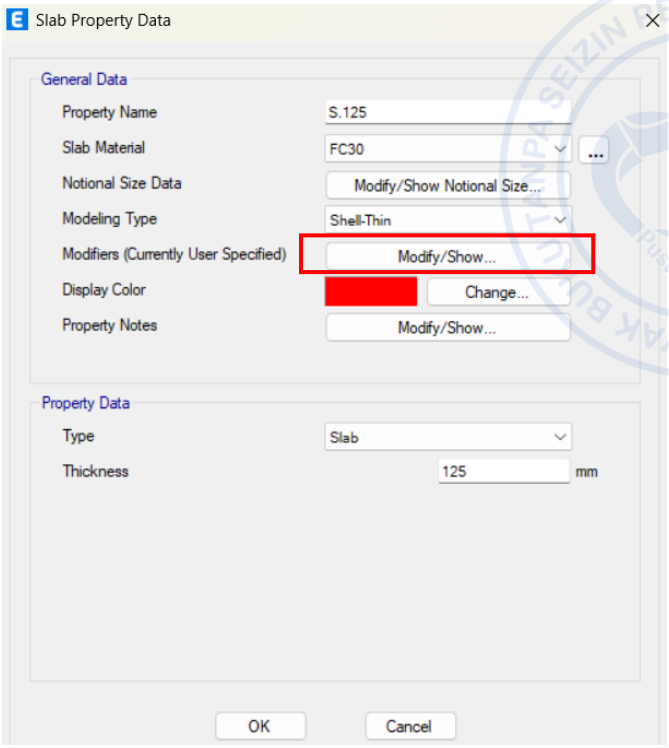
1. Pelat lantai

S 125 = Pelat lantai setebal 125 mm
S 200 = Pelat lantai setebal 200 mm

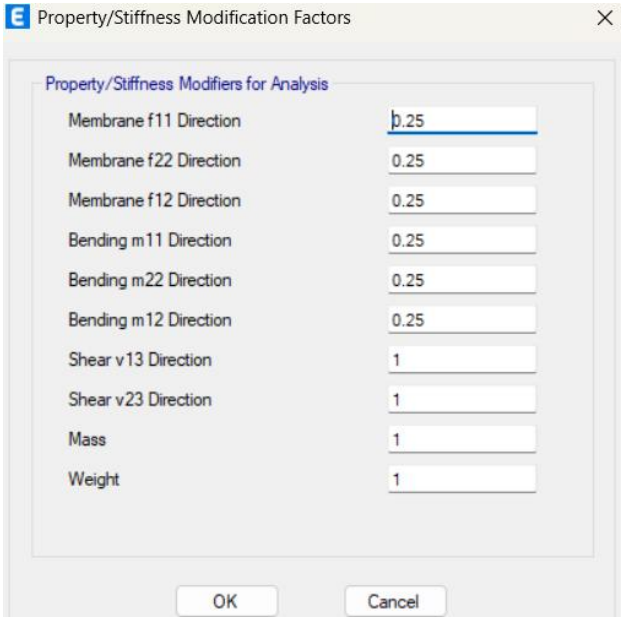
Adapun cara untuk membuat penampang pelat adalah dengan cara arahkan kursor ke menu *Define* → *Section Properties* → *Slab Sections* → *Add New Property*, maka akan muncul gambar di bawah.



Gambar 2.20 *Slab Properties*



Gambar 2.21 *Slab Property Data*



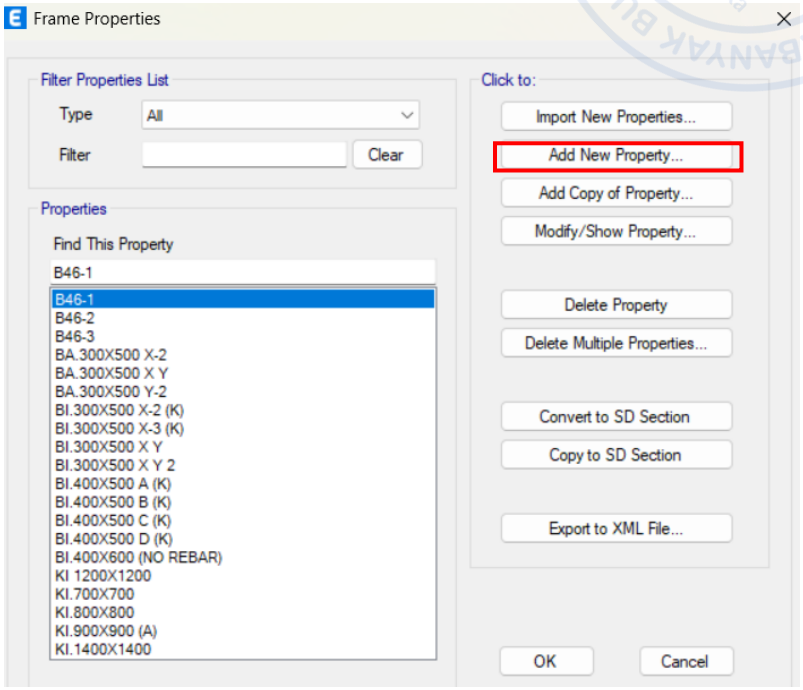
Gambar 2.22 *Property/Stiffness Modification Factors for Slab*

2. Balok

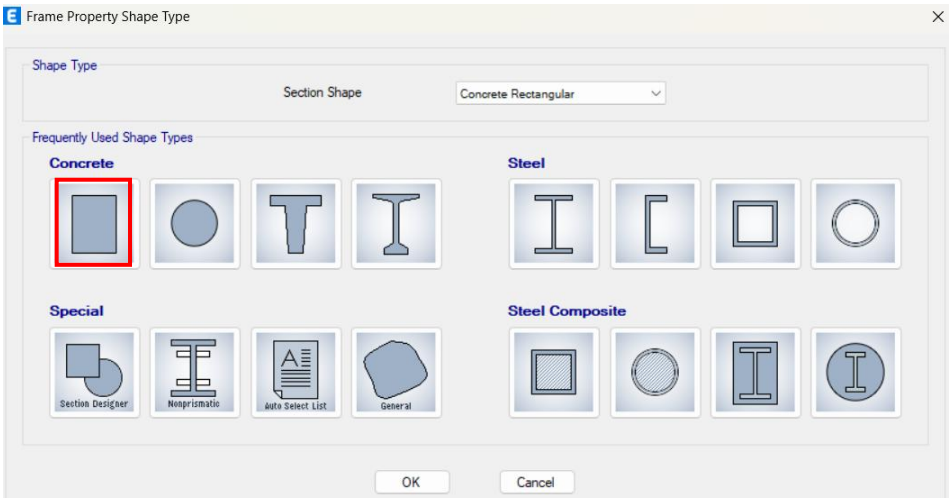
B 46	= 400 mm x 600 mm
BA 300x500 X-2	= 300 mm x 500 mm

BI 300x500 X-2 (K) = 300 mm x 500 mm
BI 400x500 X-2 A (K) = 300 mm x 500 mm

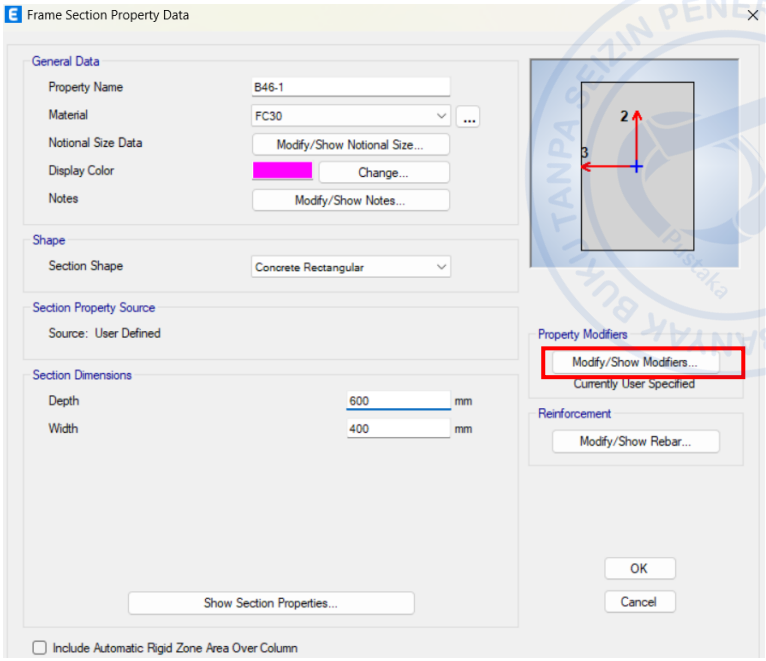
Adapun cara untuk membuat penampang balok mirip dengan membuat pelat, yaitu arahkan kursor ke menu *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections* → *Add New Property*, maka akan muncul gambar di bawah.



Gambar 2.23 *Frame Properties*



Gambar 2.24 *Frame Property Shape Type*



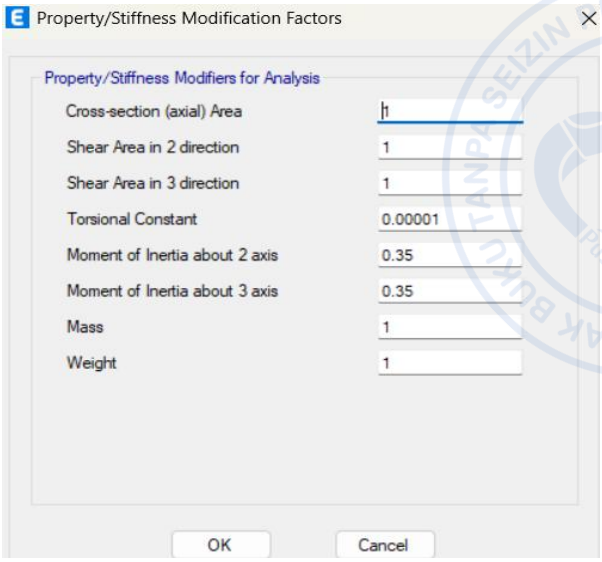
Gambar 2.25 *Frame Section Property Data*

Setelah memilih bentuk penampang balok beton, yakni persegi panjang, maka selanjutnya adalah memasukkan data-data yang telah ditentukan sebelumnya dan penting untuk menyesuaikan faktor modifikasi untuk balok yang sesuai dengan SNI 2847:2019.

Tabel 2.3
Faktor Modifikasi Kekakuan

Bagian dan kondisi		Momen inersia	Luas penampang
Kolom		0,70 I_g	1,0 A_g
Dinding	Tidak retak	0,70 I_g	
	Retak	0,35 I_g	
Balok		0,35 I_g	
Pelat datar dan *slab* datar		0,25 I_g	

(Sumber: SNI 2847:2019 Tabel 6.6.3.1.1(a))

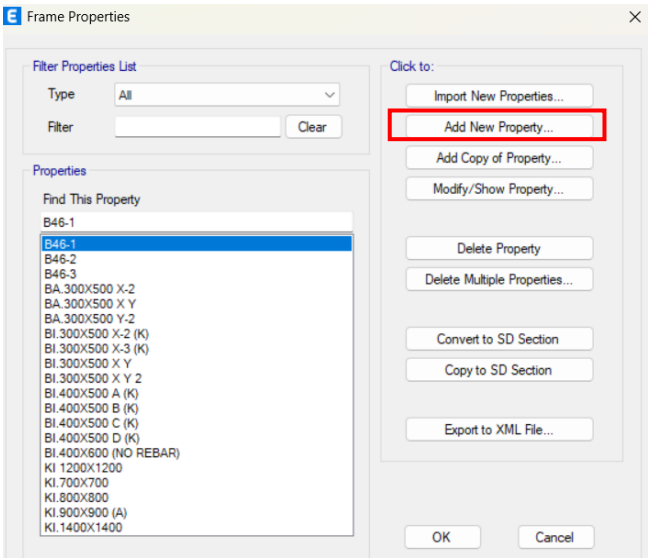


Gambar 2.26 *Property/Stiffness Modification Factor for Reinforcement Concrete Beam*

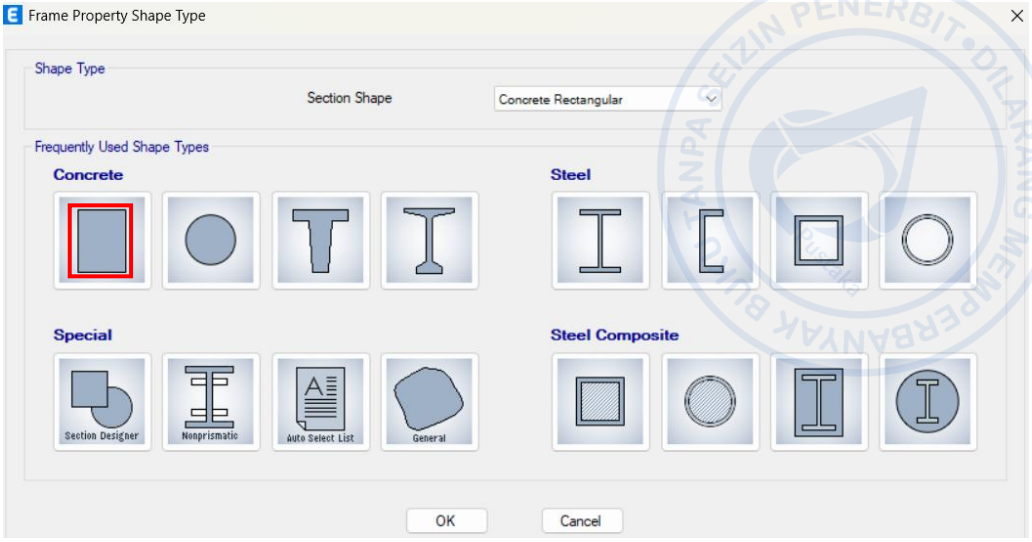
3. Kolom

KI 1400x1400 = 1400 mm x 1400 mm
KI 1200x1200 = 1200 mm x 1200 mm
KI 700x700 = 700 mm x 700 mm
KI 800x800 = 800 mm x 800 mm
KI 900x900 (A) = 900 mm x 900 mm

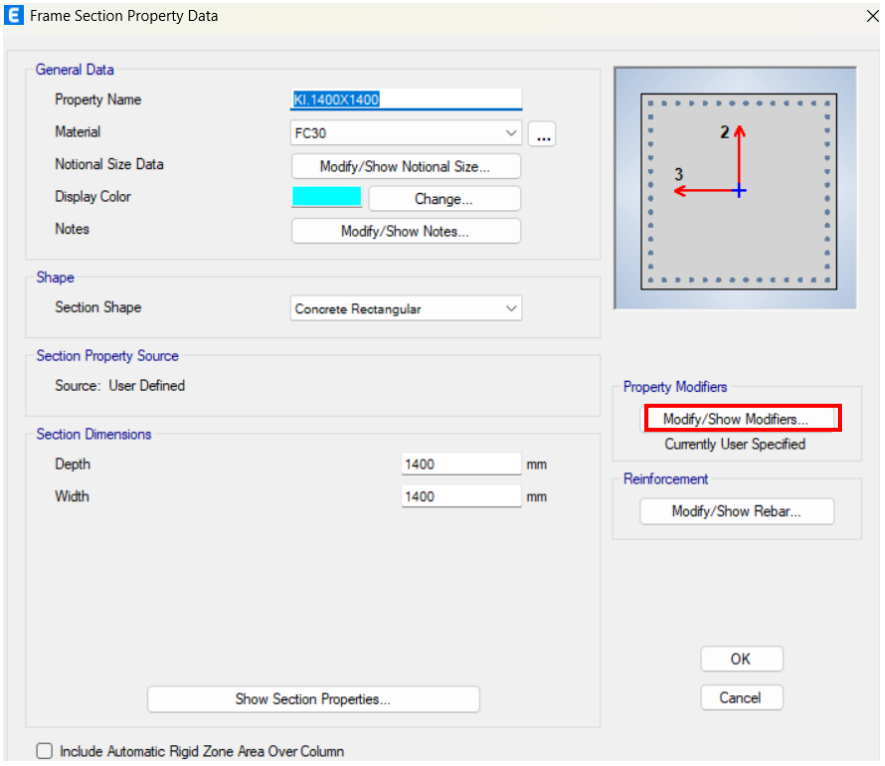
Adapun cara untuk membuat penampang kolom mirip dengan sama seperti balok, yaitu arahkan kursor ke menu *Define* → *Section Properties* → *Frame Sections* → *Add New Property*, maka akan muncul gambar di bawah.



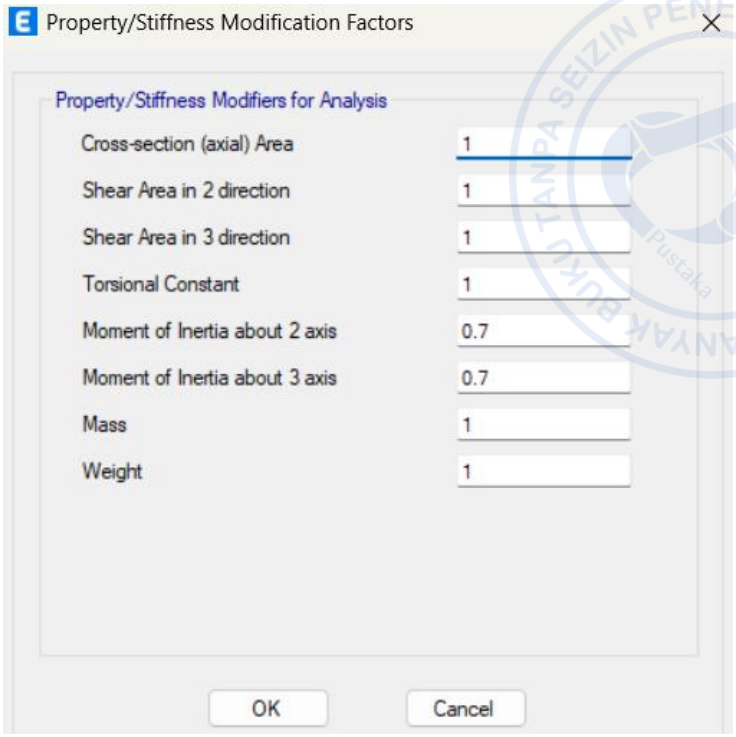
Gambar 2.27 *Frame Properties*



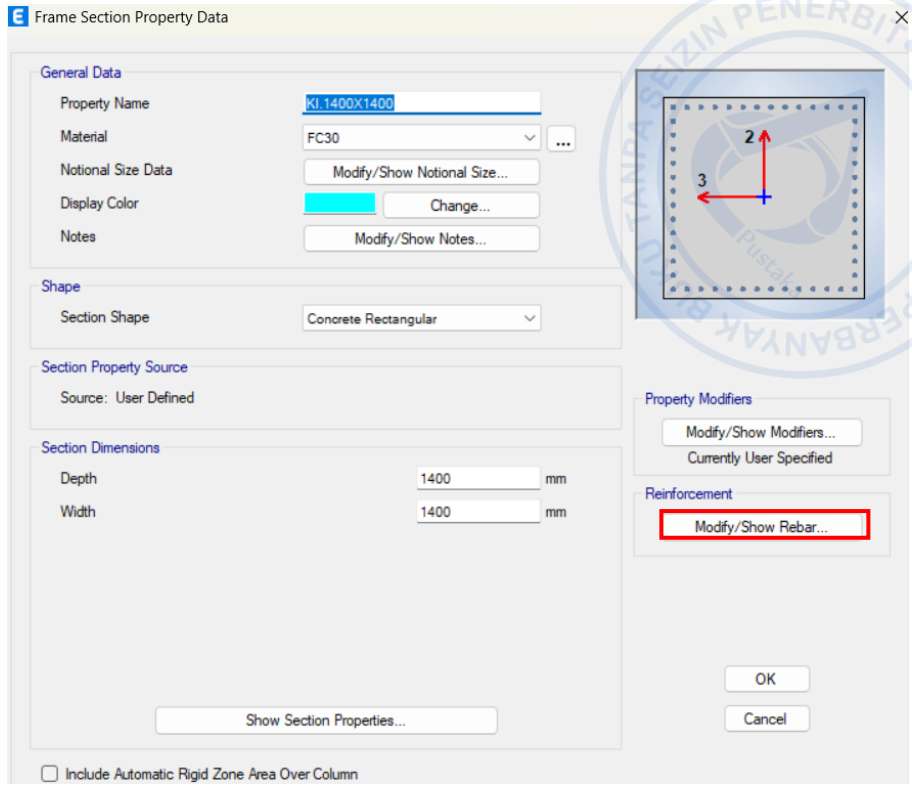
Gambar 2.28 *Frame Property Shape Type*

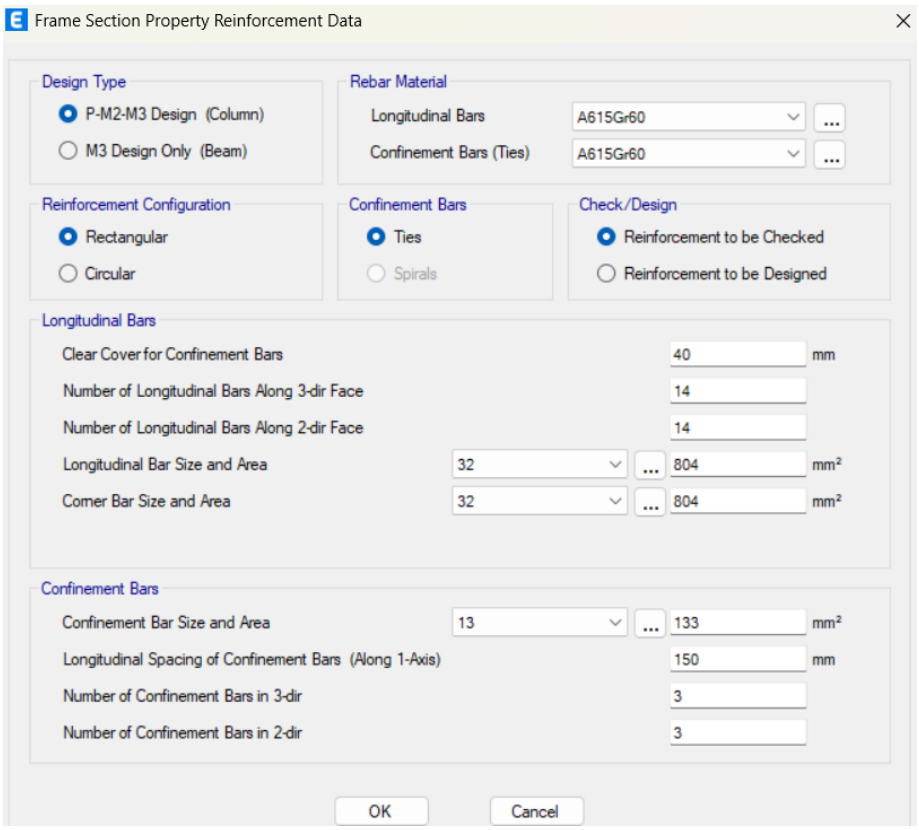


Gambar 2.29 *Frame Section Property Data*



Gambar 2.30 *Property Stiffness Modification Factor for Reinforcement Cooncrete Column*

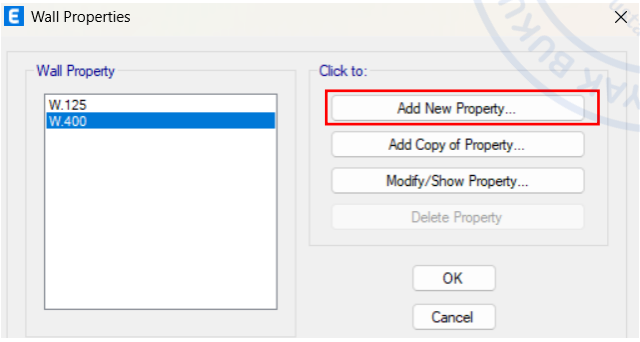




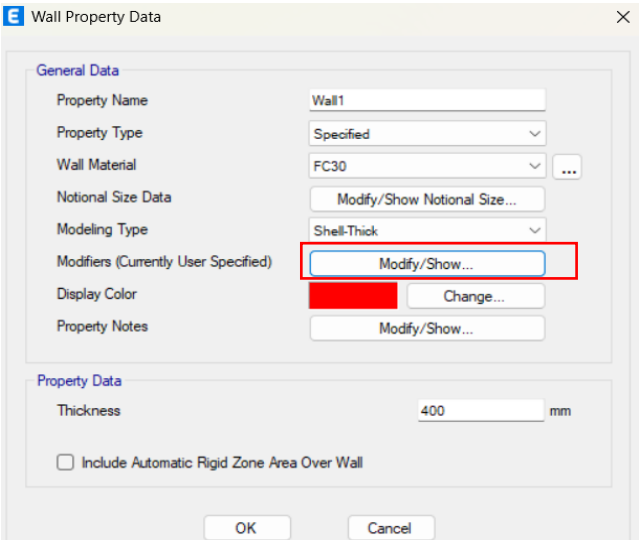
Gambar 2.31 *Modify/Show Rebar*

4. Dinding geser (*shear wall*)

Cara membuat penampang dinding geser (*shear wall*) mirip dengan pelat, balok dan kolom, yaitu dengan memilih menu *Define* → *Section Properties* → *Wall Sections* → *Add New Property*, maka akan muncul gambar di bawah.



Gambar 2.32 *Wall Properties*



Gambar 2.33 *Wall Property Data*

Untuk menentukan faktor modifikasi dinding geser, penulis mengacu kepada SNI 2847:2019 Pasal R6.6.3.1.1 seperti di bawah ini.

> Jika momen dan geser terfaktor dari analisis berdasarkan pada momen inersia dinding yang diambil sebesar $0{,}70I_g$ menunjukkan bahwa dinding akan retak oleh lentur, berdasarkan pada modulus runtuh (*rupture*), analisis harus diulang dengan $I = 0{,}35I_g$ di tingkat-tingkat dimana

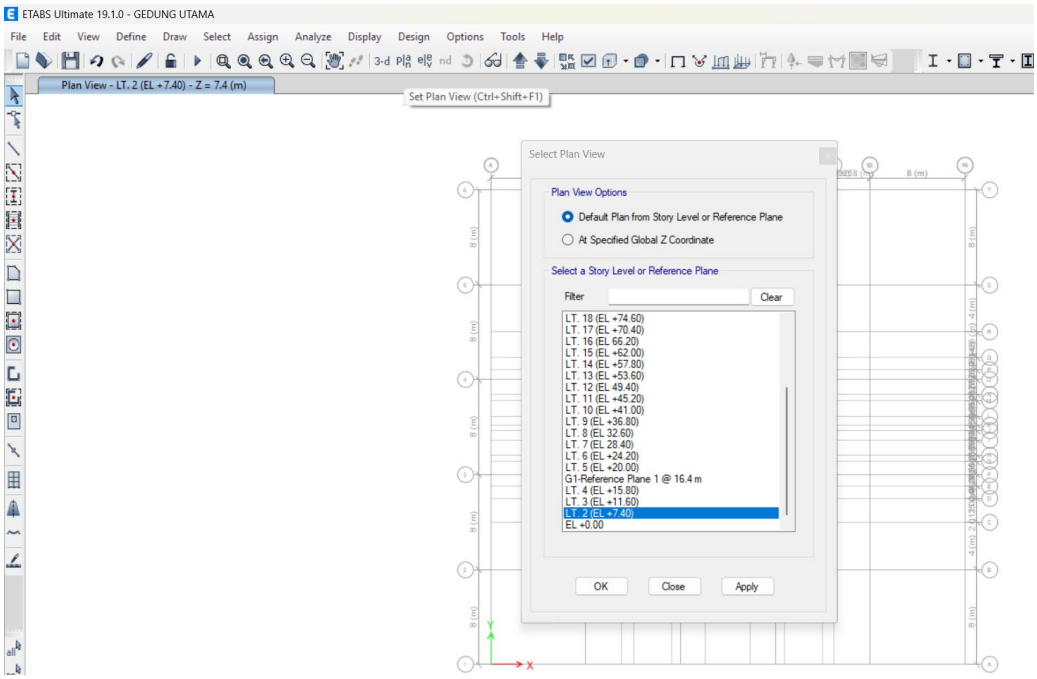
Gambar 2.34 Faktor Modifikasi Dinding Geser
(Sumber: SNI 2847:2019)

E. Pemodelan Balok, Kolom, Pelat dan *Shear Wall*

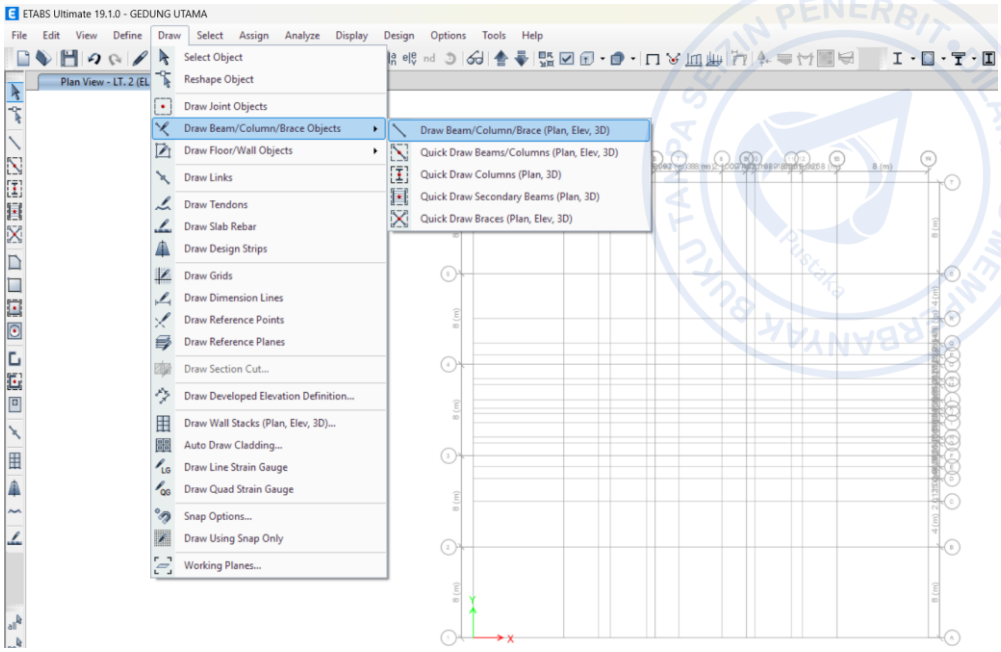
Setelah membuat penampang dari pelat, balok, *shear wall*, dan kolom selanjutnya memodelkan *properties* tersebut.

1. Memodelkan balok

   Pemodelan elemen balok beton bisa dilakukan dengan cara membuat model menjadi *view* denah terlebih dahulu, lalu klik menu *Draw → Draw Beam/Column/Brace Object → Quick Draw Column*, lalu pilih penampang balok yang akan digambar di model. Di sini penulis tidak memodelkan balok pada lantai dasar, akan tetapi langsung memodelkan pada lantai di atasnya (lantai 2).

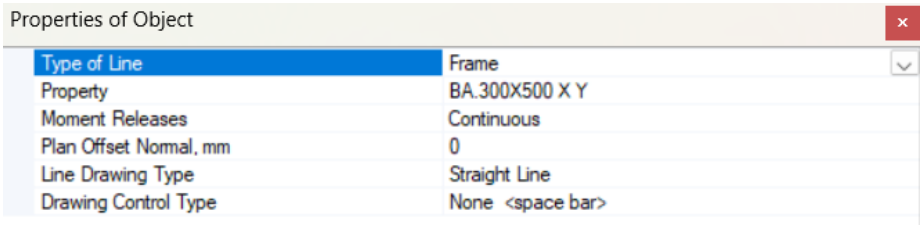


Gambar 2.35 *Set Plan View*

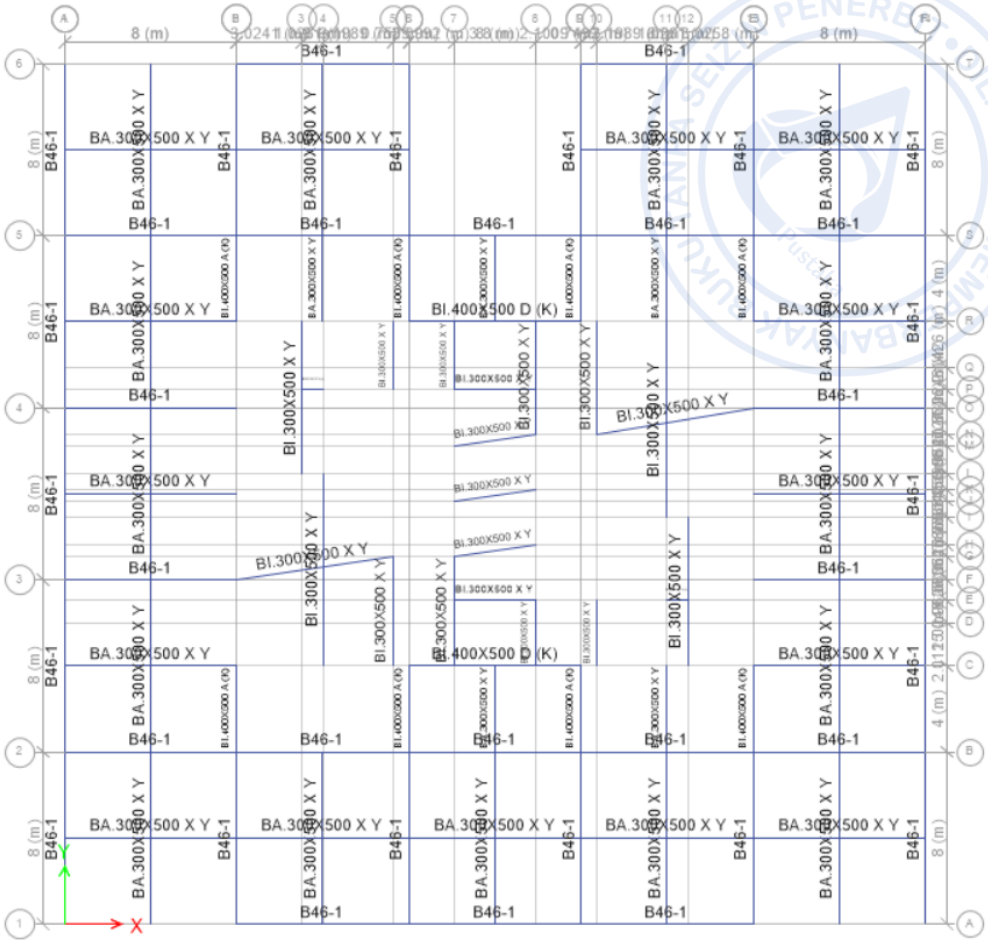


Gambar 2.36 *Draw Beam*

Adapun cara untuk memilih properti penampang balok/*beam* yang akan dimodelkan adalah dengan memilih di bagian *property* balok tersebut.



Gambar 2.37 *Properties of Object (Beam)*

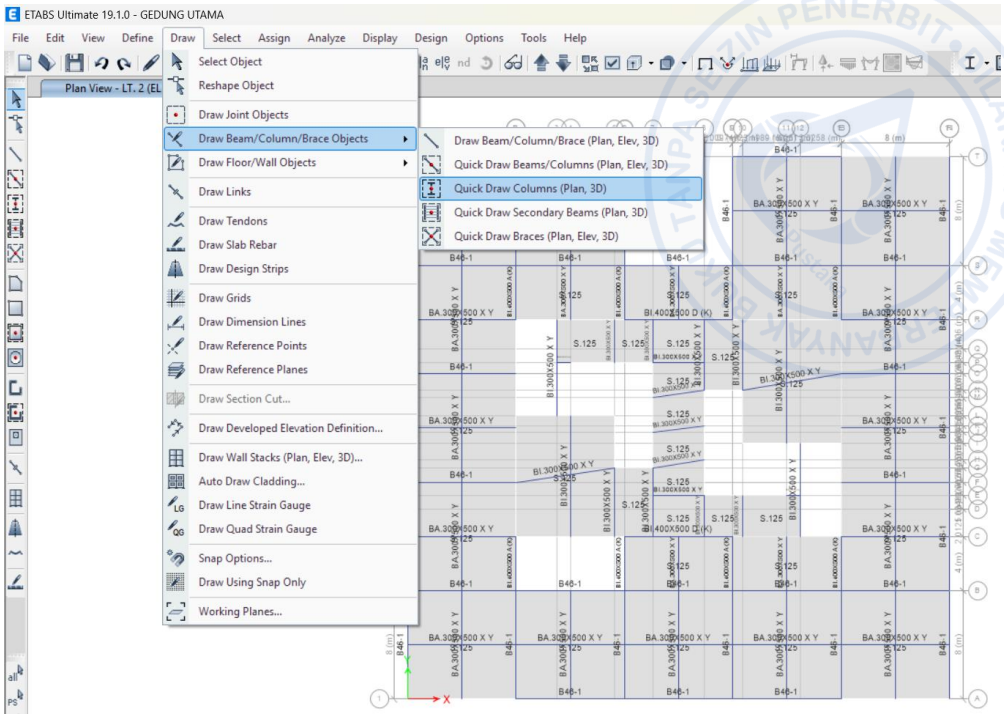


Gambar 2.38 Balok yang Sudah Termodelkan

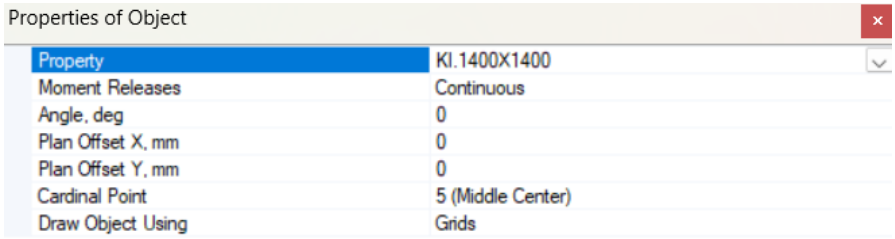
Jika sudah tergambar, maka kita akan melakukan replika/menyalin model tersebut sampai ke lantai 26.

2. Memodelkan kolom

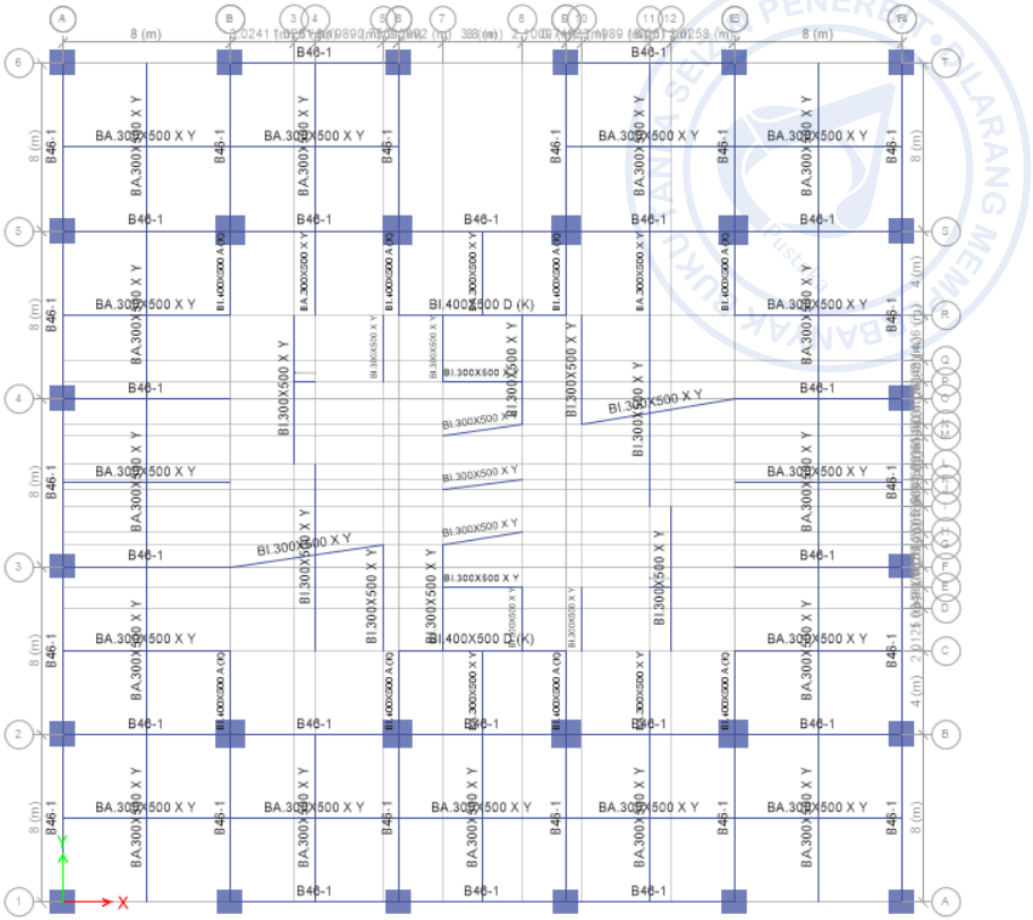
Langkah yang serupa bisa diterapkan untuk memodelkan properti kolom beton, yaitu klik menu *Draw → Draw Beam/Column/Brace Object → Quick Draw Column*, lalu pilih penampang kolom yang akan digambar di model dan juga arahnya. Di sini penulis menggunakan dua ukuran kolom sekaligus. Untuk kolom keliling bangunan menggunakan ukuran 1200 mm x 1200 mm dan untuk kolom tengah menggunakan ukuran 1400 mm x 1400 mm. Selalu awali dengan membuat model ke denah/*plan* terlebih dahulu agar memudahkan dalam penggambaran.



Gambar 2.39 *Quick Draw Column*



Gambar 2.40 Properties of Object (Column)



Gambar 2.41 Kolom yang Sudah Termodelkan

Jika sudah tergambar, maka kita akan melakukan replika/menyalin model tersebut sampai ke lantai 26.

3. Memodelkan pelat lantai

Untuk memodelkan pelat lantai, arahkan kursor ke menu *Draw Floor/Wall Object*. Ada tiga cara untuk menggambar pelat lantai:

- Opsi *Draw Floor*/*Wall*

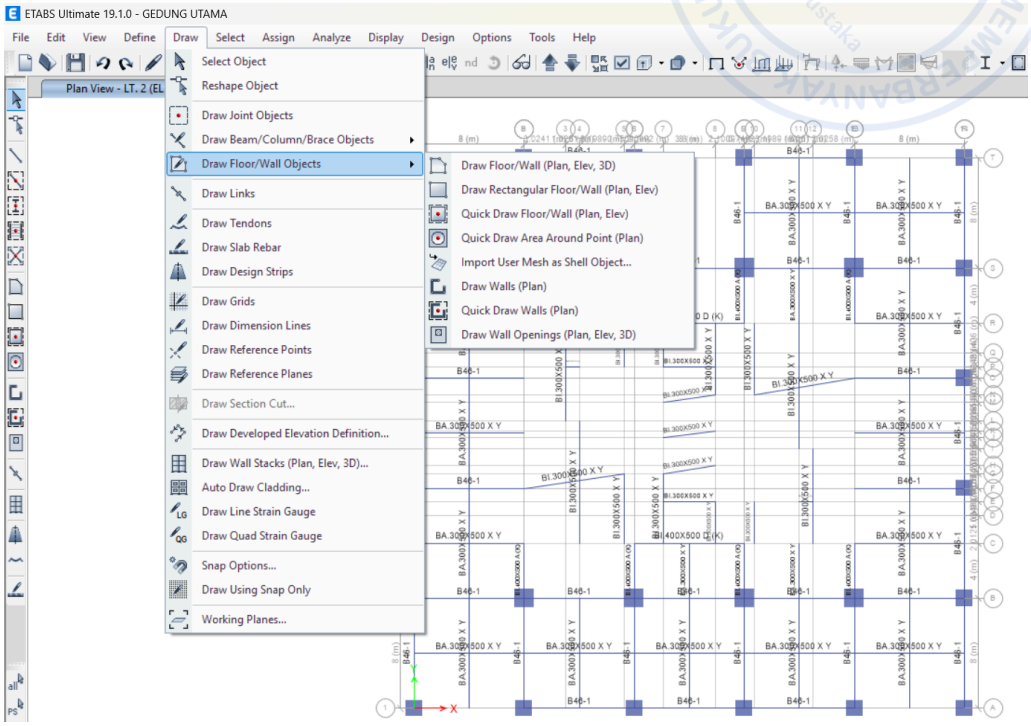
  Cara ini digunakan jika ada *grid*/AS bangunan yang tidak berbentuk persegi atau persegi panjang.

- Opsi *Draw Rectangular Floor*/*Wall*

  Cara ini digunakan pada area yang berbentuk persegi atau persegi panjang, akan tetapi ini membuat pelat lantai menjadi terpisah (jika kita masih menganggap asumsi pelat satu arah dan dua arah).

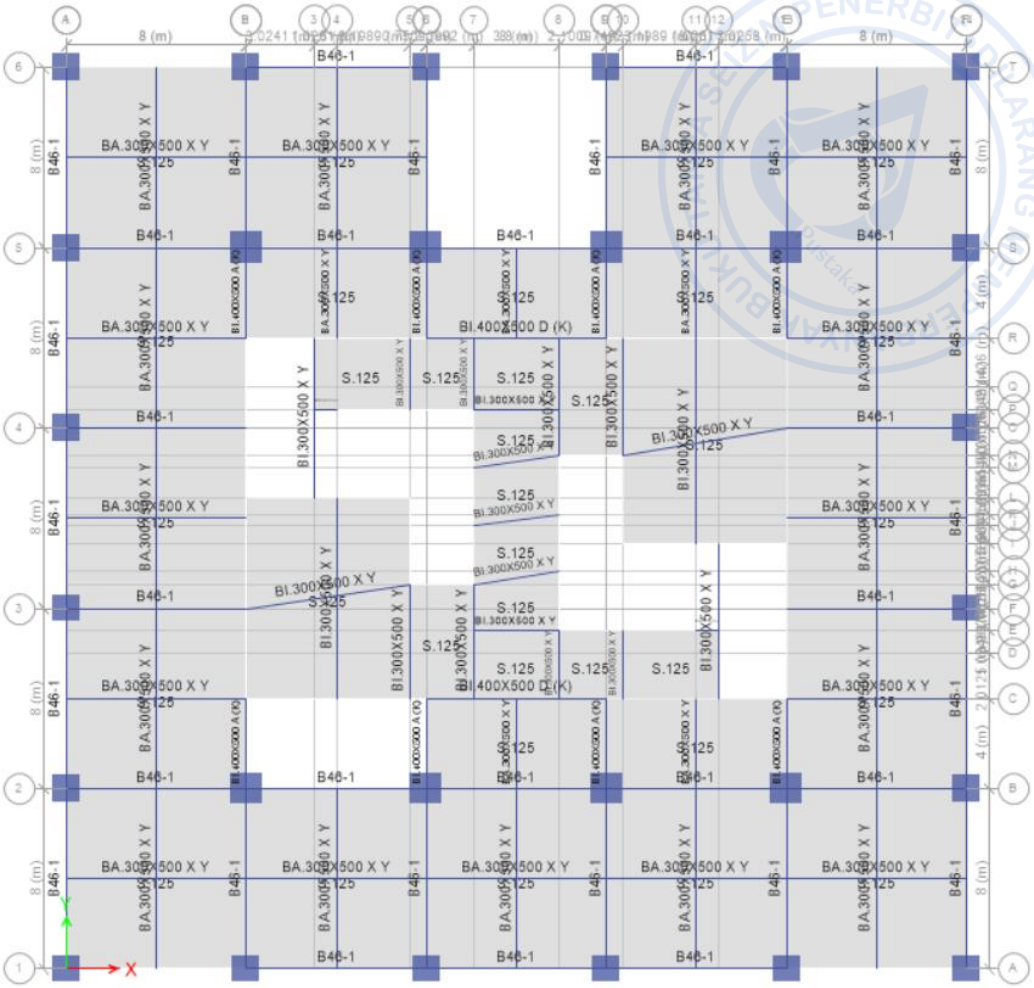
- Opsi Quick *Draw Floor/Wall*

  Cara ini adalah cara tercepat dalam memodelkan pelat lantai. Dengan cara ini, kita bisa langsung membuat elemen pelat dari kolom satu ke kolom lainnya



Gambar 2.42 *Draw Floor/Wall Object*

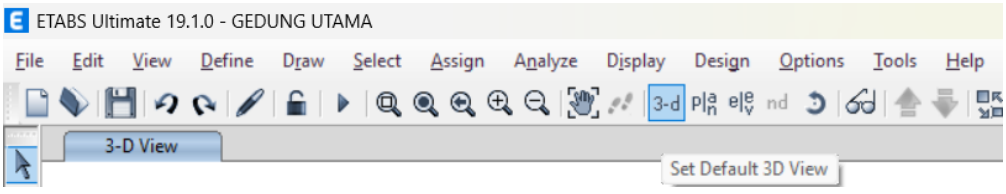
Di sini, penulis menggunakan opsi *Draw Rectangular Floor/Wall* agar bisa membentuk elemen pelat lantai persegi atau persegi panjang dengan cara menyeret/*drag* kursor. Penulis melakukan *replicate* elemen sampai ke lantai 26.



Gambar 2.43 Pelat Lantai yang Sudah Termodelkan

4. Memodelkan dinding geser/*shear wall*

Untuk memodelkan dinding geser terlebih dahulu kita memilih model 3D pada bangunan yang dirancang. Adapun caranya adalah dengan klik icon 3-d seperti yang ditunjukkan gambar di bawah.

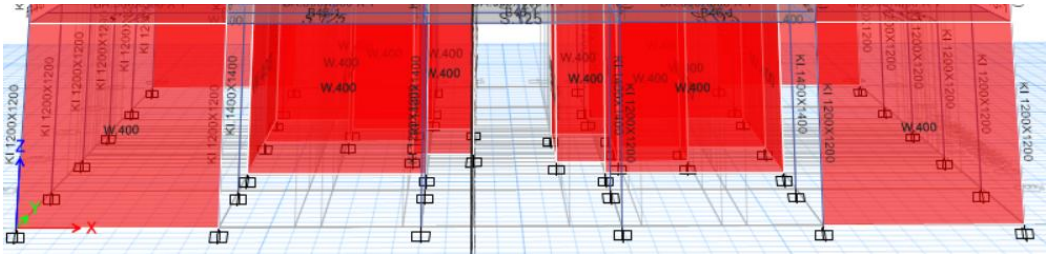


Gambar 2.44 Mengembalikan Tampilan Menjadi 3D

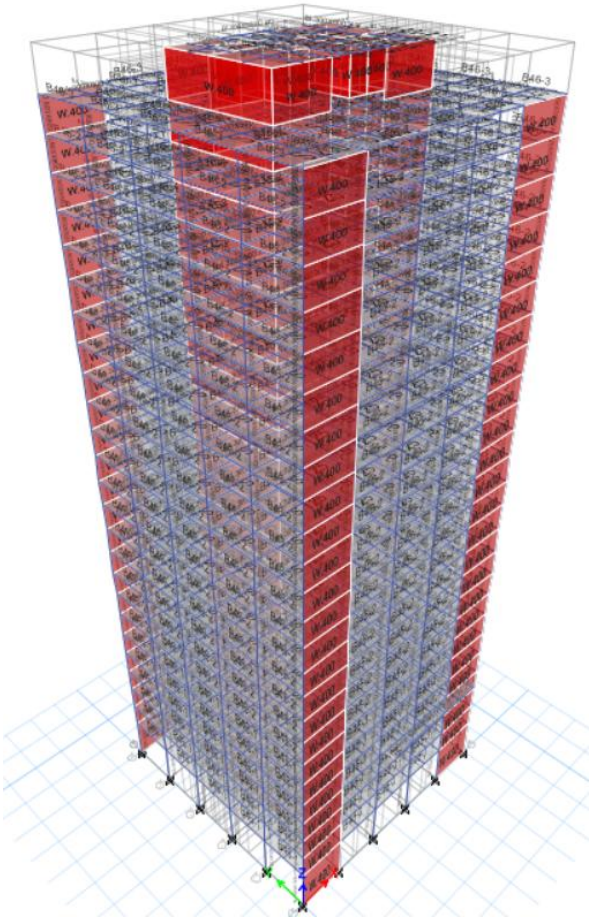
Di sini penulis menggunakan opsi *Draw Rectangular Floor*/*Wall* agar bisa membentuk elemen dinding geser/*shear wall* persegi atau persegi panjang.

Gambar 2.45 Opsi Untuk Memodelkan Dinding Geser/*Shear Wall*

Setelah itu, perbesar bangunan yang dimodelkan dan arahkan ke lantai dasar. Penulis memodelkan dinding geser dari lantai dasar samai lantai 26 dengan cara yang sama.



Gambar 2.46 Membuat *Shear Wall* di Lantai Dasar



Gambar 2.47 Keseluruhan *Shear Wall* yang Termodelkan

BAB 3

PEMBEBANAN STRUKTUR

PENERBIT TANPA SEIZIN DILARANG MEMPERBANYAK BUKU
Pustaka

A. Pembebanan Pada Struktur Rangka Momen Khusus dan Dinding Geser

Konsep pembebanan pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) dan dinding geser dalam bangunan bertingkat tinggi melibatkan integrasi beban gravitasi dan lateral untuk memastikan kestabilan struktur terhadap gaya eksternal seperti gempa. Menurut SNI 1727:2020, beban gravitasi mencakup beban mati (berat struktur sendiri) dan beban hidup (beban penggunaan bangunan), yang dihitung sebagai beban minimum untuk perencanaan gedung. Sementara itu, SNI 1726:2019 mengatur pembebanan lateral akibat gempa melalui prosedur seperti analisis spektrum respons, di mana SRPMK dirancang untuk menahan gaya lentur, geser, dan aksial secara daktail, sementara dinding geser fokus pada penahanan gaya geser horizontal. Kombinasi keduanya dalam sistem ganda memungkinkan distribusi beban yang efisien, di mana SRPMK harus memikul minimal 25% beban lateral gempa sesuai SNI 1726:2019, sehingga cocok untuk bangunan tinggi di daerah seismik tinggi.

Pada sistem SRPMK, pembebanan difokuskan pada kemampuan rangka ruang untuk menahan momen lentur dan deformasi plastis tanpa kegagalan mendadak, sebagaimana dijelaskan dalam SNI 2847:2019 yang menekankan pendetailan tulangan beton untuk daktilitas penuh. Beban gempa dari SNI 1726:2019 dihitung berdasarkan faktor respons seismik, di mana kolom dan balok memikul campuran beban aksial, momen, dan geser, dengan prinsip "*strong column-weak beam*" untuk memastikan kegagalan terjadi pada balok terlebih dahulu. Dalam bangunan bertingkat tinggi, pembebanan ini dikombinasikan dengan reduksi beban mati dari SNI 1727:2020 untuk mengoptimalkan dimensi elemen, sehingga struktur tetap ekonomis sambil menahan simpangan antar lantai yang dibatasi agar tidak melebihi ambang batas aman.

B. Beban Mati Pada Struktur

Beban mati (*self weight*) adalah beban yang muncul akibat berat sendiri profil tersebut. Adapun massa jenis yang digunakan pada kasus ini dan juga pada berbagai jenis material terlampir pada tabel di bawah.

Tabel 3.1
Massa Jenis Baja dan Beton

Material	Berat Jenis
Baja	7850 kg/m^3
Beton	2400 kg/m^3

Tabel 3.2
Massa Jenis Berbagai Material

Material	Massa Jenis (kg/m3)
Pasir	1400
Kerikil, koral split (kering/lembab)	1800
Tanah, lempung (kering/lembab)	1700
Tanah, lempung (basah)	2000
Batu alam	2600
Batu belah, batu bulat, batu gunung	1500
Batu karang	700
Batu pecah	1450
Pasangan bata merah	1700
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
Pasangan batu cetak	2200
Pasangan batu karang	1450
Kayu (kelas 1)	1000
Beton	2200
Beton bertulang	2400
Besi tuang	7250
Baja	7850
Timah hitam/timbel	11400

Beban mati tambahan (*super imposed dead load*/SD) adalah beban yang ditambahkan pada struktur yang bersifat permanen. Adapun beberapa beban mati tambahan yang digunakan pada kasus ini adalah:

1. Untuk lantai beton nonatap

   - Dinding hebel = 110 kg/m^2
   - *Homogenous tile polished* = 110 kg/m^2
   - *Ceramic unpolished tile* = 110 kg/m^2
   - *Waterproofing* + *fin* plester aci kasar = 25 kg/m^2
   - *Curtain wall* = 25 kg/m^2
   - *Equipment mekanikal*/elektrikal = 19 kg/m^2
   - Langit-langit penggantung = 10 kg/m^2
   - *Plafond* = 5 kg/m^2
   - *Floor hardener* = 3 kg/m^2
   - Pegangan tangga = 0,73 kN/m

2. Untuk lantai beton atap

   - Dinding hebel = 110 kg/m^2
   - *Curtain wall* = 25 kg/m^2
   - Gondola = 20 kg/m^2
   - *Floor hardener* = 3 kg/m^2
   - *Waterproofing* + *fin* plester aci kasar = 25 kg/m^2
   - *Equipment mekanikal*/elektrikal = 19 kg/m^2
   - Langit-langit penggantung = 10 kg/m^2
   - *Plafond* = 5 kg/m^2

C. Beban Hidup pada Struktur

Untuk keperluan desain, SNI 1727:2020 memungkinkan reduksi beban hidup berdasarkan luas area yang didukung oleh elemen struktur, seperti kolom atau balok, untuk mencerminkan kemungkinan rendahnya beban maksimum yang terjadi secara serentak di seluruh area besar. Faktor reduksi ini dihitung sesuai ketentuan standar, dengan batasan tertentu untuk memastikan keamanan struktur. Selain itu, beban hidup khusus seperti beban partisi, kendaraan, atau peralatan berat juga diatur dengan nilai spesifik sesuai jenis penggunaan, seperti garasi atau gudang. Standar ini menekankan pentingnya mempertimbangkan variasi beban hidup dalam analisis kombinasi beban untuk menjamin ketahanan dan efisiensi desain struktur.

Beban hidup menurut SNI 1727:2020 didefinisikan sebagai beban yang dihasilkan dari penggunaan atau okupansi bangunan, tidak termasuk beban mati, beban lingkungan seperti angin atau gempa, maupun beban akibat konstruksi. Beban ini mencakup berat orang, furnitur, peralatan, dan benda bergerak lainnya yang bervariasi tergantung fungsi bangunan, seperti perumahan, perkantoran, atau fasilitas umum. SNI 1727:2020 menetapkan nilai minimum beban hidup seragam (dalam

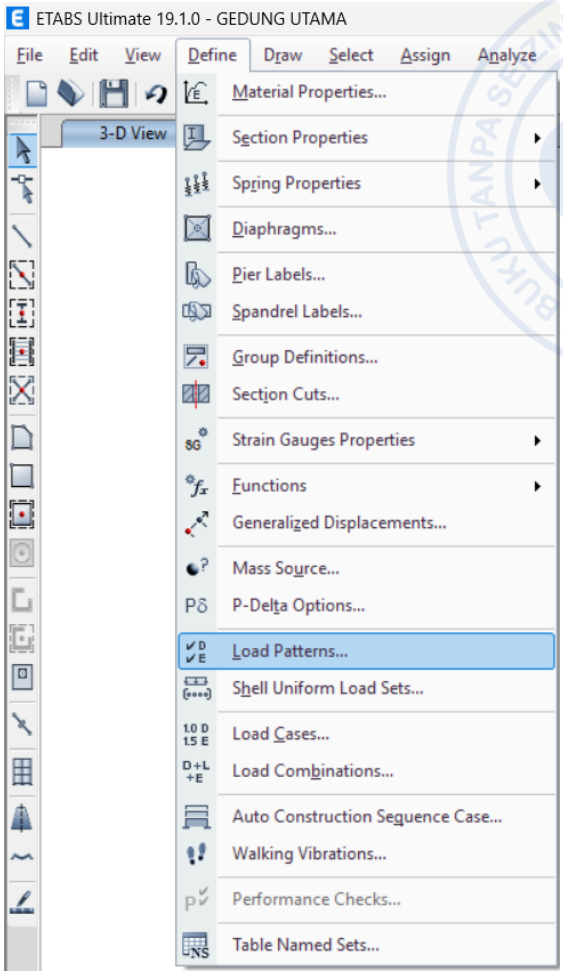
kN/m²) dan beban terkonsentrasi (dalam kN) untuk berbagai kategori penggunaan bangunan,

Berikut ini beberapa beban hidup yang digunakan pada perancangan gedung kantor 26 lantai.

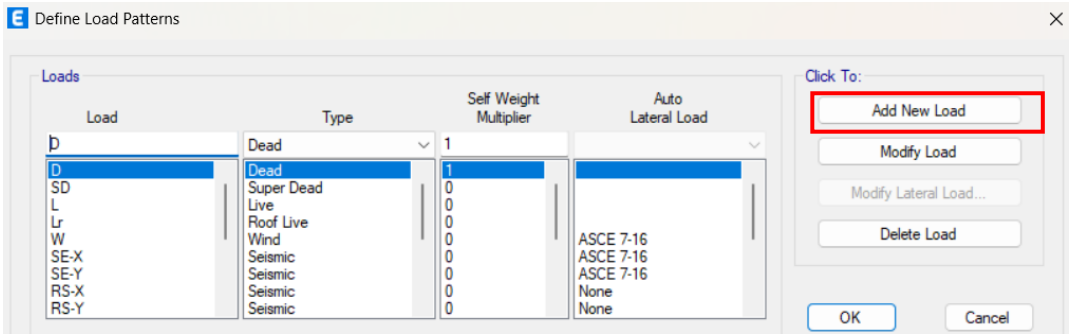
1. *Live load* (L)
   - Atap tempat berkumpul = 4,79 kN/m^2
   - Lobi dan koridor di atas lantai 1 = 3,83 kN/m^2
   - Ruang kantor = 2,4 kN/m^2
   - Ruang arsip dan computer = 1,92 kN/m^2
   - Beban partisi = 0,72 kN/m^2
2. Beban hidup pada atap (Lr)
   - Beban atap datar = 0,96 kN/m^2

D. Pembuatan *Load Pattern* untuk Masing-Masing Pembebanan

Pola pembebanan (*load pattern*) didefinisikan sebagai distribusi spasial dari serangkaian gaya, perpindahan, suhu dan pengaruh lain tertentu yang bekerja pada suatu struktur. Kombinasi sambungan dari elemen apa pun dapat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan dan kinematika. Setiap *pole* pembebanan diberikan tipe desainnya sesuai dengan tipe bebannya (misalnya *dead*, *super dead*, *live*, *wind*, *seismic*, dan lain sebagainya. Pada *software* ETABS, penentuan *load pattern* dapat dilakukan dengan cara klik menu *Define* → *Load Pattern* → *Add New Load* seperti yang ditampilkan pada gambar di bawah.



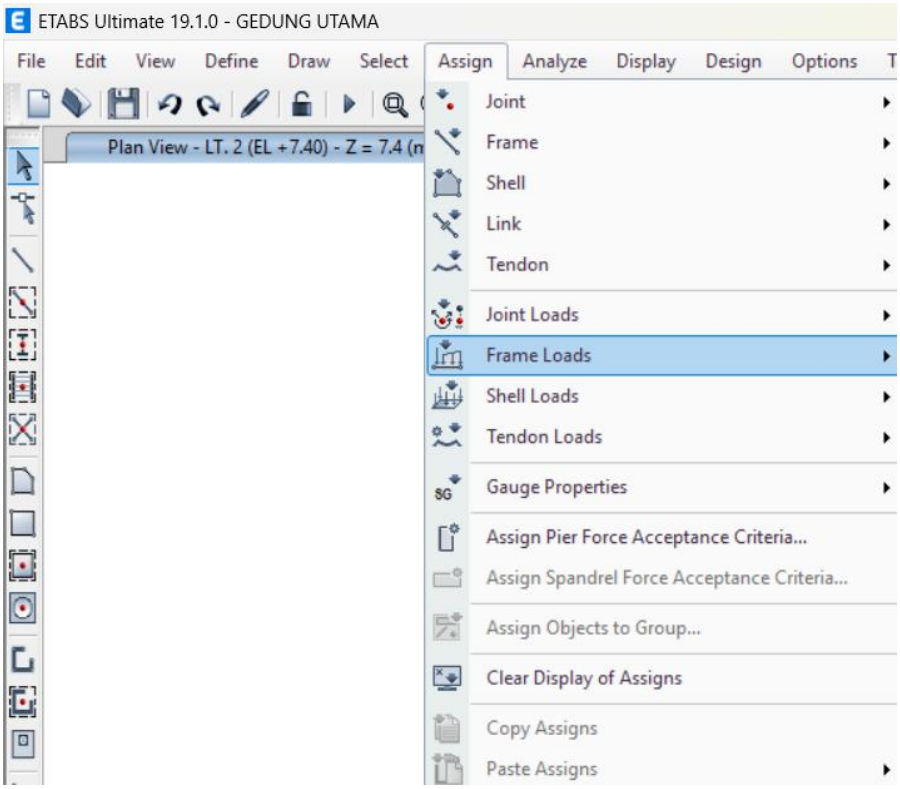
Gambar 3.1 *Define Load Pattern*



Gambar 3.2 *Add New Load Patterns*

E. Aplikasi Beban pada Struktur Melalui ETABS

Untuk menambahkan beban pada struktur yang dimodelkan di *software* ETABS dimulai dengan pendefinisian *load patterns*, yang merupakan distribusi spasial dari beban-beban seperti *dead load*, *live load*, *seismic*, atau *wind load*. Pengguna dapat mengakses menu *Assign* → *Frame Loads* atau *Shell Loads* untuk menambahkan pola beban baru, di mana nama pola, jenis beban (misalnya *reducible live* atau *other*), dan *multiplier self-weight* ditentukan. *Multiplier self-weight* biasanya diatur ke 1 untuk pola *dead load* agar mencakup berat sendiri struktur, sementara pola lain diatur ke 0 untuk menghindari duplikasi. Untuk beban lateral seperti *seismic* atau *wind*, opsi *auto lateral load* dapat dipilih berdasarkan kode standar tertentu, yang secara otomatis menghitung dan mendistribusikan beban sesuai parameter yang dimasukkan.

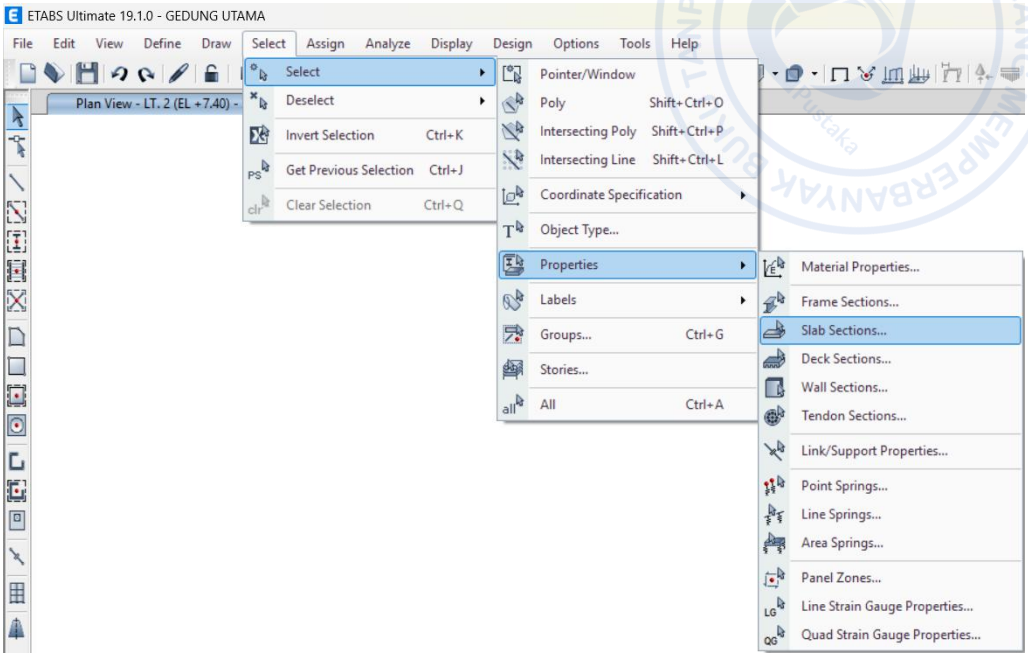


Gambar 3.3 *Assign Loads*

1. Pengaplikasian beban pada pelat lantai

   Untuk mengaplikasikan beban pada pelat lantai, terlebih dahulu kita memilih/*select* pelat lantai yang akan ditambahkan bebannya, yaitu dengan cara klik menu *Select* → *Select* → *Properties* → *Slab Sections*, lalu pilih ukuran pelat

lantai yang akan diberikan beban. Di sini penulis melakukan penambahan beban pada pelat sampai ke lantai 26.



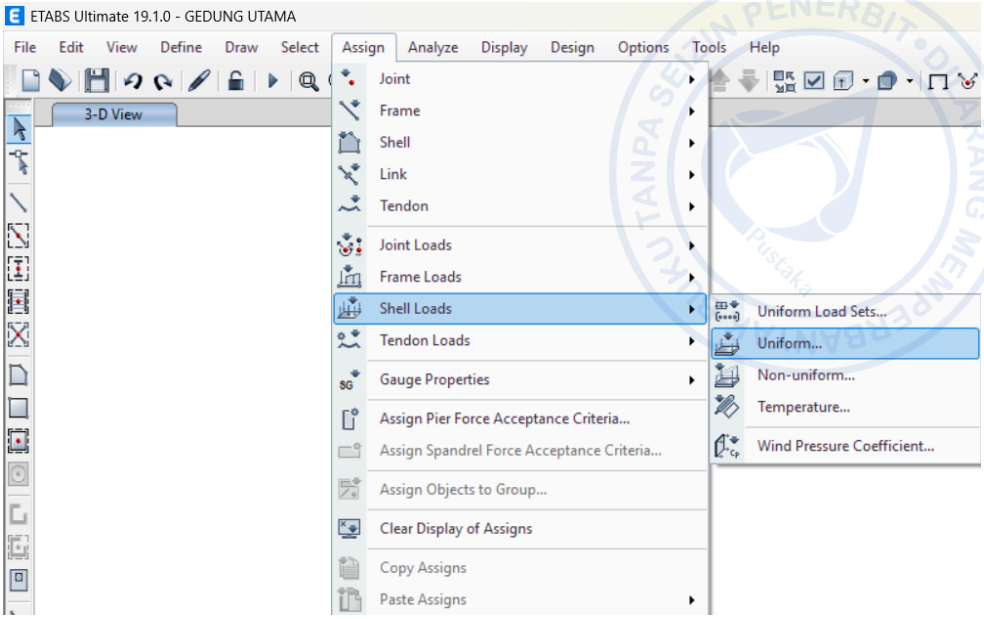
Gambar 3.4 *Slab Sections*

- Beban hidup pada pelat

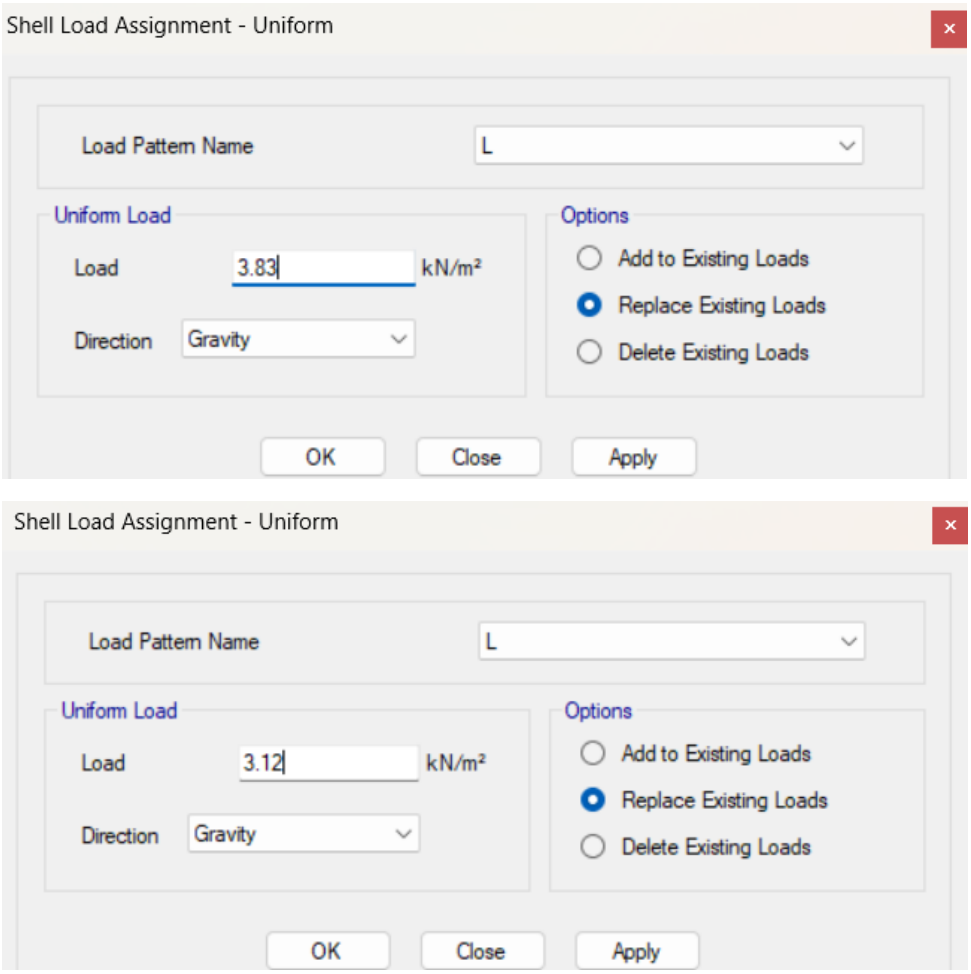
  Lobi dan koridor di atas lantai 1 = 3,83 kN/m^2
  Ruang kantor = 2,4 kN/m^2
  Partisi = 0,72 kN/m^2

  Untuk beban hidup ruang kantor dan partisi penulis melakukan penjumlahan langsung yaitu 3,12 kN/m^2

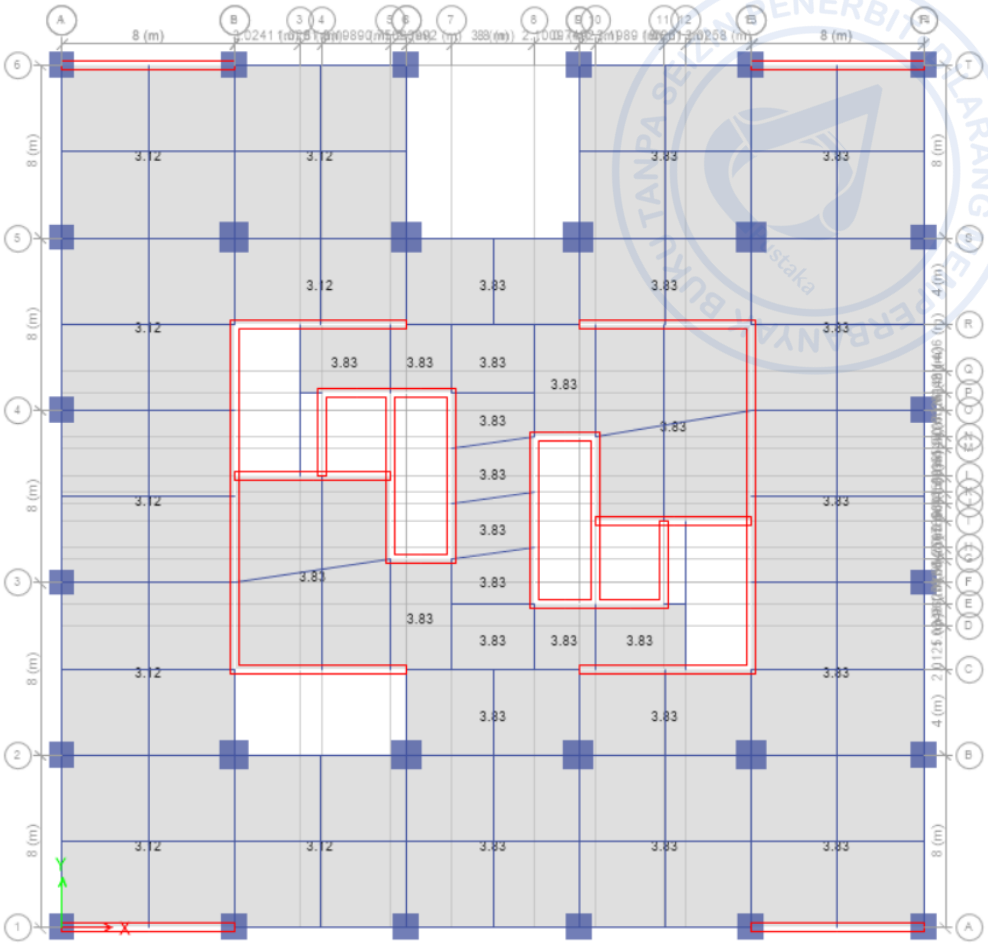
  Setelah mengetahui beban hidup saja yang akan diaplikasikan pada pelat lantai, selanjutnya kita akan melakukan penginputan beban pada pelat tersebut. Caranya adalah klik menu *Assign* → *Shell Loads* → *Uniform*.



Gambar 3.5 *Shell Uniform Loads*



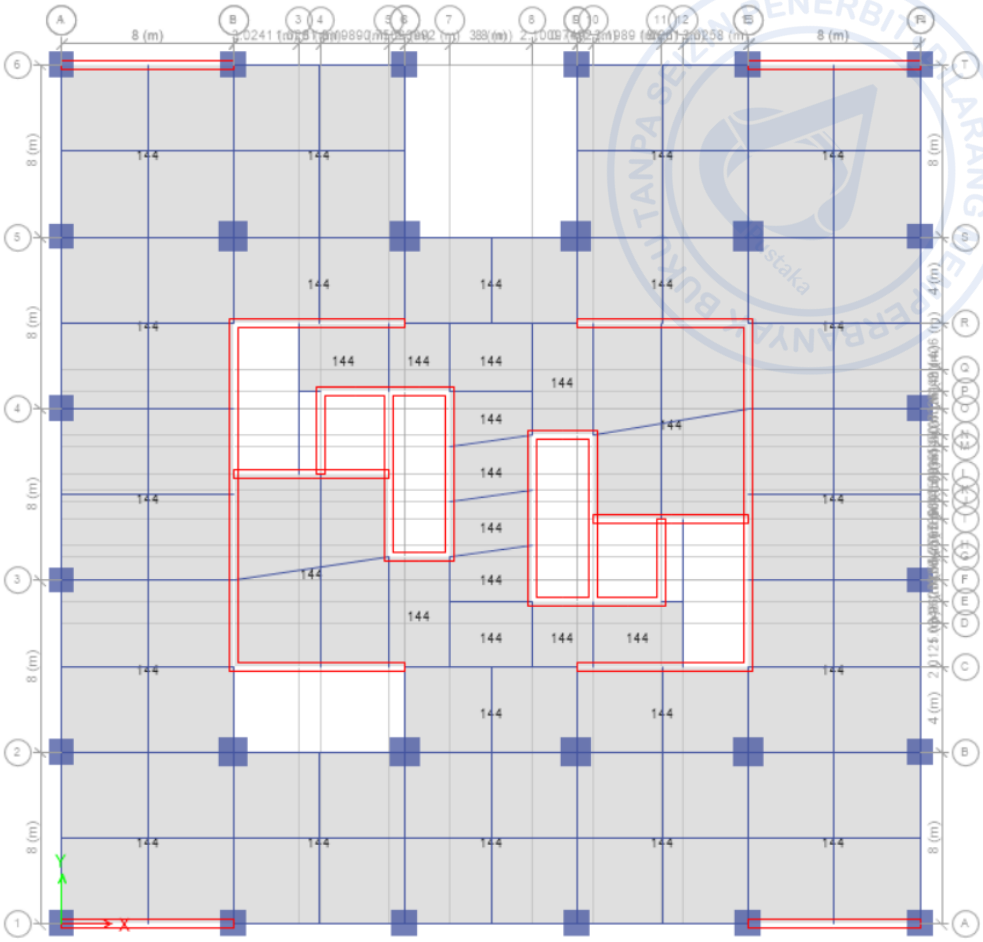
Gambar 3.6 *Shell Load Assignment*



Gambar 3.7 Beban Hidup pada Pelat Lantai Yang Telah diaplikasikan

- Beban mati tambahan pada pelat

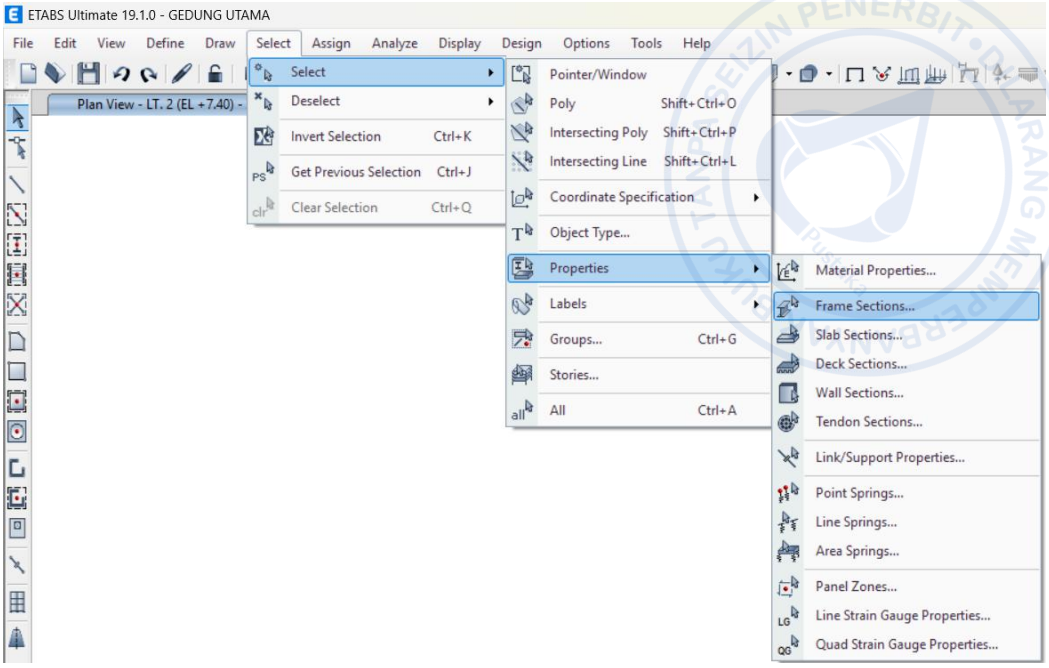
Tile	= 110 kg/m^2	
Equipment mekanikal/elektrikal	= 19 kg/m^2	
Langit-langit penggantung	= 10 kg/m^2	
Plafond	= 5 kg/m^2	+
	= 144 kg/m^2	



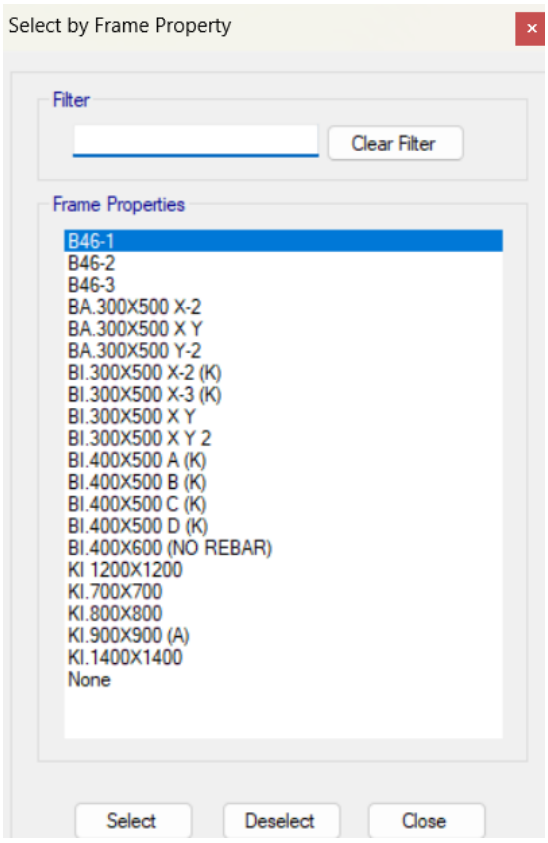
Gambar 3.8 Beban Mati Tambahan pada Pelat Lantai yang Telah Diaplikasikan

2. Pengaplikasian beban pada balok

Untuk mengaplikasikan beban pada balok, terlebih dahulu kita memilih/*select* balok yang akan ditambahkan bebannya, yaitu dengan cara klik menu *Select* → *Select* → *Properties* → *Frame Sections*, lalu pilih ukuran balok yang akan diberikan beban. Di sini penulis melakukan penambahan beban pada balok sampai ke lantai 26.



Gambar 3.9 *Frame Sections*

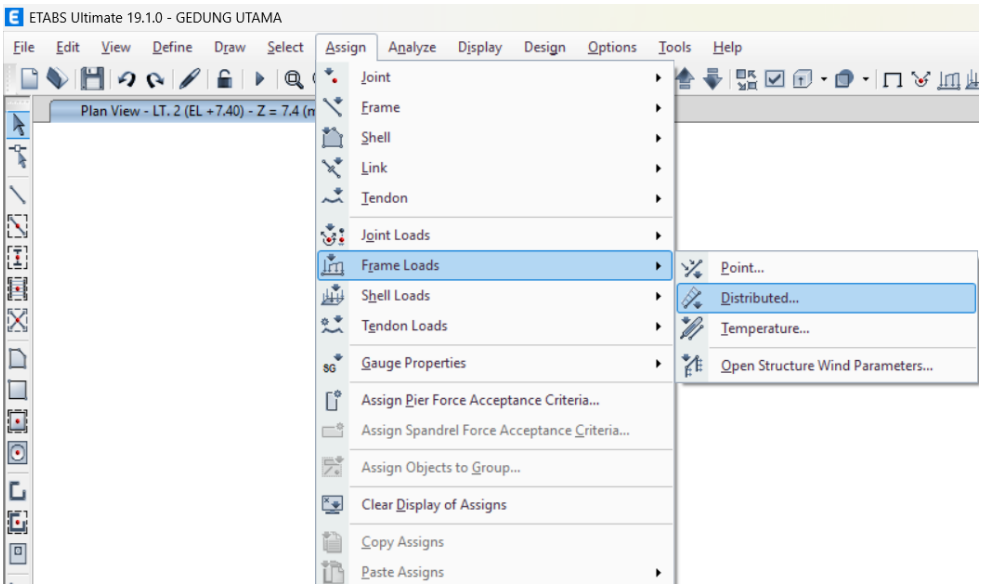


Gambar 3.10 *Select by Frame Propoerty*

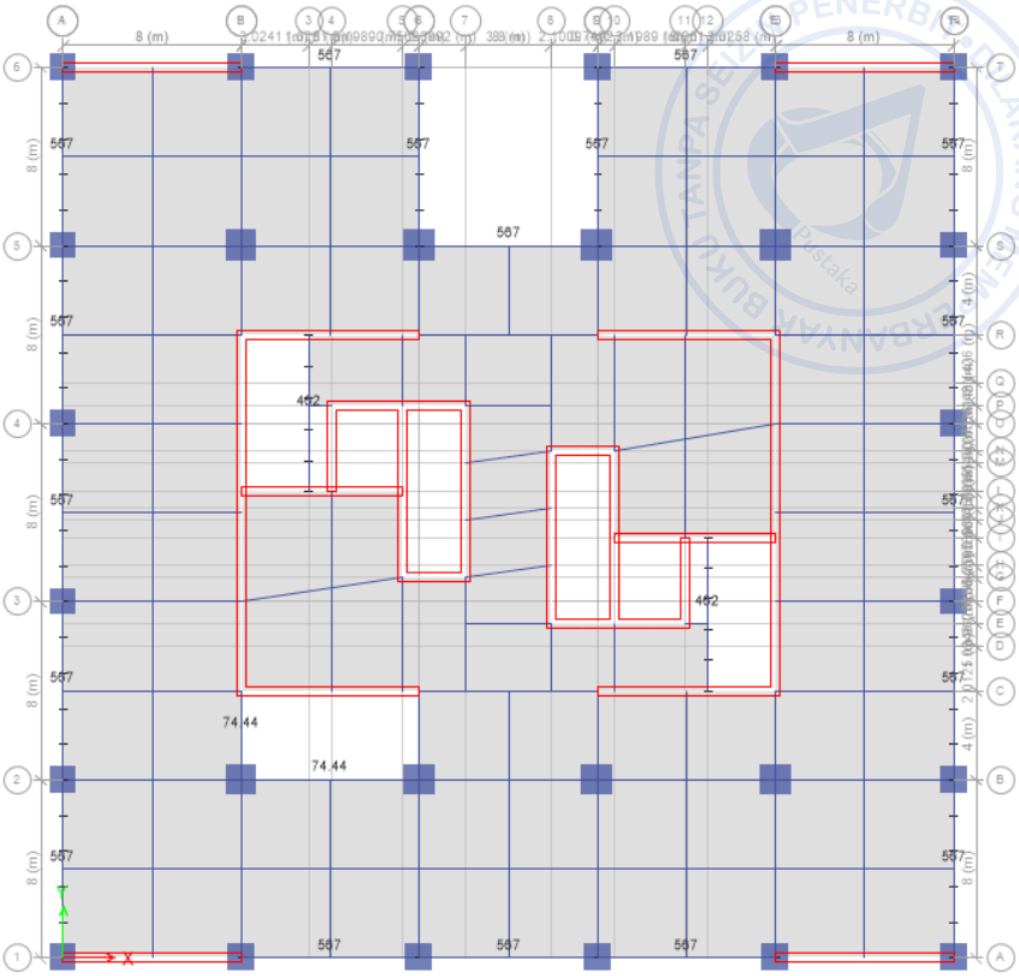
- Beban mati tambahan pada balok

Dinding hebel (tinggi 4,2 m)	= 110 kg/m^2 x 4,2 m	= 462 kg/m	
Curtain wall	= 25 kg/m^2 x 4,2 m	= 105 kg/m	+
		= 567 kg/m	
Pegangan tangga		= 74,44 kg/m	

Setelah mengetahui beban mati tambahan saja yang akan diaplikasikan pada balok, selanjutnya kita akan melakukan penginputan beban pada pelat tersebut. Caranya adalah klik menu *Assign* → *Frame Loads* → *Distributed*.



Gambar 3.11 *Frame Loads*



Gambar 3.12 Beban Mati Tambahan pada Pelat Balok yang Telah Diaplikasikan

BAB 4

ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR RANGKA DUAL SISTEM MOMEN KHUSUS TERHADAP BEBAN GEMPA

A. Analisis Kegempaan pada Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus

Analisis kegempaan pada struktur rangka pemikul momen khusus (SRPMK) merupakan pendekatan desain yang menekankan daktilitas tinggi untuk menahan beban gempa melalui mekanisme lentur, geser, dan aksial pada elemen balok serta kolom. Berdasarkan SNI 2847:2019, SRPMK dirancang dengan konsep "*strong column weak beam*" untuk memastikan kolom lebih kuat daripada balok, sehingga deformasi plastis terjadi terutama pada balok dan menghindari keruntuhan mendadak. Standar ini juga mengatur mutu beton minimum 21 MPa untuk struktur SRPMK, serta detail tulangan longitudinal dan sengkang yang ketat untuk meningkatkan kapasitas disipasi energi. Sementara itu, SNI 1726:2019 menyediakan tata cara perencanaan ketahanan gempa, termasuk penentuan zona gempa dan faktor respons seismik, sedangkan SNI 8460:2017 melengkapi dengan persyaratan geoteknik untuk fondasi yang mendukung stabilitas struktur di tanah rawan gempa.

Dalam analisis kegempaan sesuai SNI 1726:2019, struktur SRPMK dievaluasi menggunakan metode *response spectrum* dinamis atau analisis statik ekuivalen untuk menghitung gaya geser dasar dan distribusi beban lateral. Faktor reduksi respons (R) untuk dual sistem biasanya bernilai 7, yang mencerminkan tingkat daktilitas tinggi, dengan koefisien *overstrength* (Ω0) sebesar 2,5 dan defleksi amplifikasi (Cd) 5,5. Analisis ini mempertimbangkan parameter situs seperti percepatan spektrum desain (SDS dan SD1) berdasarkan peta gempa nasional, serta efek torsi pada bangunan tidak beraturan. Integrasi dengan SNI 8460:2017 memastikan bahwa investigasi geoteknik, termasuk uji sondir atau bor, digunakan untuk menilai potensi likuifaksi tanah dan menentukan kapasitas dukung fondasi yang aman terhadap gaya gempa.

SNI 2847:2019 menekankan detail struktural SRPMK, seperti jarak sengkang maksimum 1/4 tinggi balok di zona sendi plastis untuk mencegah geser gagal, serta rasio tulangan minimum 1% hingga 6% pada kolom agar memenuhi kriteria *ductile*. Analisis kegempaan melibatkan verifikasi simpangan antar lantai (*drift*) tidak melebihi 0,02 kali tinggi lantai, serta pemeriksaan kapasitas sambungan balok-kolom menggunakan desain kapasitas untuk memastikan kinerja inelastis yang baik.

Tabel 4.1
Koefisien untuk Dual Sistem

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R[a]	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0[b]	Faktor pembesaran defleksi, C_d[c]	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)[d]				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D[e]	E[e]	F[f]
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
21. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10[k]	TI[k]	TI[k]
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI[l]	TI[l]	TI[l]
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus[m]	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan[n]	3½	3[o]	3½	10	10	10	10	10
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus[g,h]	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa[g]	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 12)

Secara keseluruhan, integrasi ketiga standar ini memastikan analisis kegempaan SRPMK holistik, mulai dari perencanaan seismik hingga detail geoteknik, sehingga struktur mampu menyerap energi gempa tanpa keruntuhan total. SNI 8460:2017 khususnya menambahkan lapisan keamanan dengan persyaratan analisis stabilitas lereng dan mitigasi bahaya geoteknik seperti amblesan tanah pasca-gempa. Pendekatan ini telah diterapkan pada berbagai bangunan tinggi di Indonesia, menghasilkan desain yang lebih ekonomis dan aman, dengan simulasi perangkat lunak seperti ETABS untuk validasi. Hasilnya, SRPMK dan dual sistem menjadi pilihan utama untuk wilayah gempa tinggi, mendukung prinsip keselamatan masyarakat sesuai regulasi nasional.

1. Penentuan Kategori Risiko Gempa dan Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko gempa menurut SNI 1726:2019 adalah klasifikasi yang digunakan untuk menentukan tingkat kepentingan dan potensi risiko bangunan terhadap gempa bumi, yang menjadi dasar penentuan faktor keutamaan gempa (Ie). Kategori ini dibagi menjadi empat tingkat (I hingga IV) berdasarkan fungsi bangunan, jumlah penghuni, dan konsekuensi kegagalan struktur terhadap keselamatan jiwa serta dampak sosial-ekonomi. Klasifikasi ini membantu insinyur dalam merancang struktur yang sesuai dengan tingkat ketahanan seismik yang diperlukan, memastikan bangunan esensial tetap berfungsi setelah gempa, sementara bangunan biasa dirancang dengan efisiensi yang tetap aman.

Penentuan kategori risiko ini berperan penting dalam analisis desain seismik, seperti dalam metode statik ekivalen atau *response spectrum*, karena memengaruhi beban gempa desain dan simpangan struktur. Misalnya, bangunan kategori IV dirancang dengan beban gempa lebih besar untuk menjamin operasionalitasnya setelah kejadian seismik. SNI 1726:2019 juga memberikan pengecualian, seperti pada sistem isolasi seismik, di mana Ie diambil 1,0 untuk semua kategori risiko guna menghindari desain berlebihan. Dengan pendekatan ini, SNI 1726:2019 memastikan bahwa desain struktur seimbang antara keamanan, fungsi, dan efisiensi biaya sesuai dengan risiko seismiknya.

Kategori risiko gedung kantor 26 lantai ini ditentukan berdasarkan fungsi bangunan. Bangunan yang dirancang berfungsi sebagai kantor yang memiliki kategori risiko II seperti yang ditampilkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.2
Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non-Gedung untuk Beban Gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik	II

(Sumber: Tabel 3 SNI 1726:2019)

Faktor keutamaan gempa (Ie) menurut SNI 1726:2019 merupakan parameter penting dalam perencanaan ketahanan struktur bangunan terhadap gempa bumi. Faktor ini berfungsi untuk menyesuaikan tingkat desain seismik berdasarkan tingkat risiko dan kepentingan fungsional bangunan, sehingga struktur yang lebih krusial mendapatkan perlindungan ekstra agar tetap beroperasi pasca-gempa. Dalam standar ini, Ie digunakan dalam perhitungan respons spektral percepatan gempa, di mana nilai tersebut dikalikan dengan parameter seperti SDS dan SD1 untuk menghasilkan beban gempa desain yang lebih akurat dan aman. Tujuannya adalah meminimalkan kerusakan pada fasilitas esensial, seperti rumah sakit atau pusat komando darurat, yang harus tetap fungsional selama dan setelah kejadian gempa.

Nilai faktor keutamaan gempa ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan, sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019 Tabel 4. Kategori risiko I atau II, yang mencakup bangunan biasa seperti rumah tinggal atau gedung perkantoran standar, memiliki Ie sebesar 1,0. Sementara itu, kategori III untuk bangunan dengan *occupancy* tinggi atau risiko kerusakan signifikan terhadap masyarakat, seperti sekolah atau pusat perbelanjaan besar, menggunakan Ie 1,25. Untuk kategori IV, yang meliputi fasilitas esensial seperti rumah sakit, stasiun pemadam kebakaran, atau instalasi nuklir, Ie ditingkatkan menjadi 1,5 untuk memastikan ketahanan maksimal.

Dalam aplikasi praktis, faktor keutamaan gempa ini terintegrasi dalam metode analisis seperti *response spectrum* atau statik ekivalen, di mana Ie memengaruhi besarnya gaya geser dasar (V) dan simpangan struktur. Misalnya, pada bangunan gedung kantor ini kategori II, Ie tetap 1,0, sehingga desain

mengikuti beban standar. Namun, ada pengecualian khusus, seperti pada struktur dengan sistem isolasi seismik, di mana Ie diambil sebesar 1,0 terlepas dari kategori risiko, untuk menghindari *overdesign*. Hal ini memungkinkan perencanaan yang efisien sambil menjaga keselamatan sesuai dengan prinsip SNI 1726:2019.

Tabel 4.3
Faktor Keutamaan Gempa (Ie)

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

(Sumber: Tabel 4 SNI 1726:2019)

2. Penentuan Kelas Situs dan Parameter Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019, penentuan kelas situs adalah langkah krusial dalam analisis desain seismik untuk mengevaluasi karakteristik tanah di lokasi bangunan, yang memengaruhi respons struktur terhadap gempa. Kelas situs ditentukan berdasarkan parameter geoteknik, seperti kecepatan rambat gelombang geser (Vs), jumlah pukulan standar penetrasi (N-SPT), atau kekuatan geser tanah tak terdrainase (Su). Proses ini dimulai dengan pengumpulan data geoteknik melalui pengujian lapangan atau laboratorium, yang kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan situs ke dalam salah satu dari enam kategori: SA (situs batuan keras), SB (batuan), SC (tanah keras), SD (tanah sedang), SE (tanah lunak), atau SF (tanah sangat lunak yang memerlukan studi khusus). Klasifikasi ini memengaruhi nilai parameter respons spektral (SDS dan SD1) yang digunakan dalam perhitungan beban gempa.

Kelas situs ditentukan berdasarkan SNI 1726-2019 berdasarkan data penyelidikan tanah yang tersedia. Pada proyek ini, hanya diketahui satu jenis data penyelidikan tanah yang digunakan untuk menentukan kelas situs, yaitu berupa data N-SPT/*Bore Hole*. Terdapat dua data *Bore Hole*, yaitu BH-2 dan BH-3 yang dapat dilihat pada bagian lampiran. Berdasarkan SNI 1726-2019 apabila hanya memperhitungkan satu jenis data tanah, maka kelas situs yang digunakan adalah kelas situs yang paling rendah sesuai ketentuan yang terdapat pada SNI 1726-2019. Namun, pada perhitungan ini, penentuan kelas situs murni berdasarkan nilai yang diperoleh dari data N-SPT. Analisis data N-SPT untuk penentuan kelas situs disajikan pada tabel sebagai berikut.

Tabel 4.4

Data *Bore Hole* 2

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST (N = Number of blows; P = Penetration (cm); 0 10 20 30 40 50 60)	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
25 Juli '21										
	± 0.00									Timbunan puing
	- 1.00			2 / 15	3 / 15	3 / 15	N = 6			Contoh : I (- 1,50 + - 2,00) m SPT : 1 (- 2,00 + - 2,45) m Lempung lanauan, merah
	- 3.50		MAT - 5.00 M	2 / 15	2 / 15	3 / 15	N = 5			Contoh : II (- 3,50 + - 4,00) m SPT : 2 (- 4,00 + - 4,45) m Lempung kelanauan, abu - abu Contoh : III (- 5,50 + - 6,00) m
	- 6.00			4 / 15	7 / 15	10 / 15	N = 17			SPT : 3 (- 6,00 + - 6,45) m Lanau pasiran, abu - abu
	- 7.50			21 / 15	37 / 15	40 / 7	N > 60			SPT : 4 (- 8,00 + - 8,37) m Pasir kasar, coklat muda
	- 9.00			24 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 5 (- 10,00 + - 10,30) m Lanau membatu, coklat muda
				26 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 6 (- 12,00 + - 12,30) m Lanau membatu, coklat muda

Activ
Go to

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST N = Number of blows (0 10 20 30 40 50 60) P = Penetration (cm)	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
25 Juli '21	- 13.00									
	- 13.50									Lanau membatu, coklat muda
				28 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 7 (- 14,00 + - 14,30) m Pasir membatu, abu - abu tua
				27 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 8 (- 16,00 + - 16,30) m Pasir membatu, abu - abu tua
	- 17.00									
				26 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 9 (- 18,00 + - 18,30) m Lanau membatu, coklat muda
	- 19.50									
				24 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 10 (- 20,00 + - 20,30) m Pasir membatu, coklat
				26 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 11 (- 22,00 + - 22,30) m Pasir membatu, coklat
				28 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 12 (- 24,00 + - 24,30) m Pasir membatu, coklat
	- 26.00									

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST N = Number of blows (0 10 20 30 40 50 60) P = Penetration (cm)	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
25 Juli '21	- 26.00									
				25 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 13 (- 26,00 + - 26,30) m Pasir membatu, coklat
	- 27.00									
				20 / 15	38 / 15	45 / 10	N > 60			SPT : 14 (- 28,00 + - 28,40) m Lanau kelempungan membatu, abu - abu
				18 / 15	35 / 15	40 / 12	N > 60			Lanau kelempungan membatu, abu - abu SPT : 15 (- 30,00 + - 30,42) m
	- 30.50									KETERANGAN : Muka Air Tanah (MAT) dijumpai pada kedalaman : - 5,00 m

Tabel 4.5

Data *Bore Hole* 3

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST N = Number of blows P = Penetration (cm) 0 10 20 30 40 50 60	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
23 Juli '21										
	± 0.00			2 / 15	2 / 15	3 / 15	N = 5			Contoh : I (- 1,50 + - 2,00) m SPT : 1 (- 2,00 + - 2,45) m Lempung kelanauan, coklat
	- 3.00			2 / 15	3 / 15	5 / 15	N = 8			Contoh : II (- 3,50 + - 4,00) m SPT : 2 (- 4,00 + - 4,45) m Lempung kelanauan, abu - abu tua
	- 5.00			3 / 15	5 / 15	8 / 15	N = 13			Contoh : III (- 5,50 + - 6,00) m SPT : 3 (- 6,00 + - 6,45) m Lanau pasiran, abu - abu
	- 7.00		MAT - 7.00 M	18 / 15	32 / 15	40 / 15	N > 60			SPT : 4 (- 8,00 + - 8,45) m Pasir kasar, abu - abu
	- 9.00			23 / 15	37 / 15	45 / 15	N > 60			SPT : 5 (- 10,00 + - 10,45) m Lanau membatu, coklat muda
				25 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 6 (- 12,00 + - 12,30) m Lanau membatu, coklat muda

Activ
Go to

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST N = Number of blows P = Penetration (cm) 0 10 20 30 40 50 60	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
23 Juli '21	- 13.00									
				27 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 7 (- 14,00 + - 14,30) m Pasir membatu, abu - abu kehitaman
				26 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 8 (- 16,00 + - 16,30) m Pasir membatu, abu - abu kehitaman
	- 17.00			18 / 15	29 / 15	40 / 15	N > 60			SPT : 9 (- 18,00 + - 18,45) m Lanau kelempungan, abu - abu
				24 / 15	38 / 15	45 / 15	N > 60			SPT : 10 (- 20,00 + - 20,45) m Lanau kelempungan, abu - abu
				27 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 11 (- 22,00 + - 22,30) m Lanau kelempungan, abu - abu
	- 23.00			28 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 12 (- 24,00 + - 24,30) m Pasir membatu, hitam
	- 26.00									

DATE	DEPTH (m)	BORING PROFILE	STANDARD PENETRATION TEST N = Number of blows P = Penetration (cm) 0 10 20 30 40 50 60	N/P	N/P	N/P	Remark	qu POCKET PENETRO METER	CORE RECOVERY %	LITHOLOGIC DESCRIPTION
23 Juli '21	- 26.00									
				26 / 15	60 / 15	-	N = 60			SPT : 13 (- 26,00 + - 26,30) m Pasir membatu, hitam
				20 / 15	35 / 15	40 / 8	N > 60			SPT : 14 (- 28,00 + - 28,38) m Pasir membatu, hitam
	- 29.00			19 / 15	30 / 15	45 / 15	N > 60			Lanau membatu, abu - abu SPT : 15 (- 30,00 + - 30,45) m
	- 30.50									KETERANGAN : Muka Air Tanah (MAT) dijumpai pada kedalaman : - 7,00 m

Activ

Berdasarkan nilai N dari masing-masing data *bore hole* tersebut di atas, maka diperoleh nilai $\bar{N}$ (N rata-rata) yaitu sebesar 49,14 (untuk BH-2) dan 49 (untuk BH-2). Lalu kita lihat pada Tabel 5 SNI 1726:2019 untuk menentukan klasifikasi situsnya.

Tabel 4.6
Klasifikasi Situs

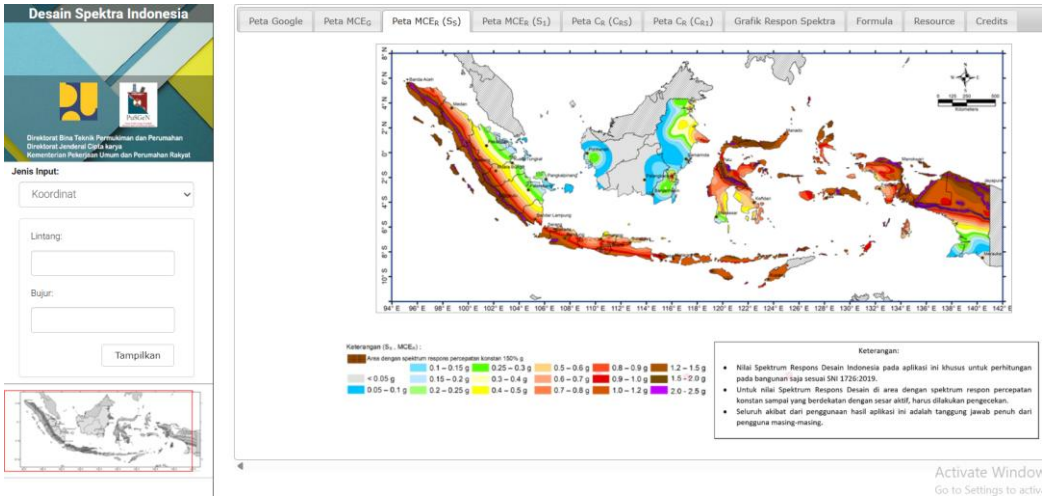
Kelas situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	*50 sampai100*
SE (tanah lunak)	< 175	<15	*< 50*
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karateristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan H > 3 m)		

Koefisien situs menurut SNI 1726:2019 adalah parameter penting yang digunakan untuk mengoreksi respons spektral gempa berdasarkan karakteristik geoteknik tanah di lokasi bangunan. Koefisien situs, yang terdiri dari Fa (koefisien amplifikasi untuk periode pendek) dan Fv (koefisien amplifikasi untuk periode panjang), ditentukan berdasarkan kelas situs (SA hingga SF) dan intensitas gempa yang diwakili oleh nilai percepatan spektral periode pendek (Ss) dan periode panjang (S1). Proses ini dimulai dengan penentuan kelas situs melalui pengujian geoteknik, seperti kecepatan rambat gelombang geser (Vs30), jumlah pukulan N-SPT, atau kekuatan geser tanah (Su), sesuai Pasal 11.4 SNI 1726:2019. Koefisien ini kemudian digunakan untuk menghitung percepatan spektral desain (SDS dan SD1) yang menentukan beban gempa pada struktur.

Penerapan koefisien situs dalam desain seismik dilakukan dengan mengalikan nilai Ss dengan Fa untuk mendapatkan SDS (SDS = 2/3 × Fa × Ss) dan nilai S1 dengan Fv untuk mendapatkan SD1 (SD1 = 2/3 × Fv × S1). Nilai ini kemudian digunakan dalam analisis *response spectrum* atau statik ekivalen untuk menghitung beban gempa desain. Penting untuk memastikan bahwa data geoteknik akurat, karena kesalahan dalam penentuan kelas situs dapat menyebabkan nilai koefisien yang tidak tepat, sehingga memengaruhi keamanan struktur. Untuk kasus khusus, seperti sistem isolasi seismik, SNI 1726:2019

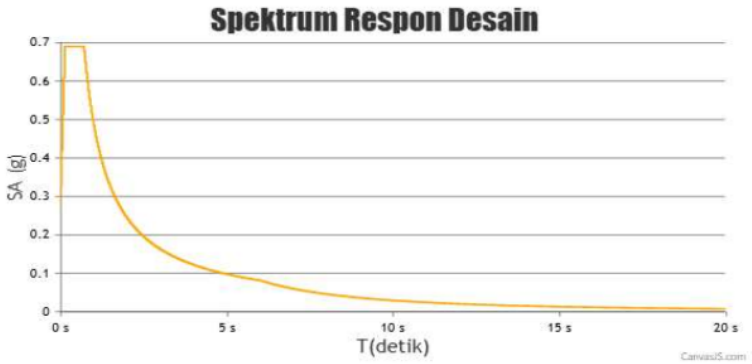
memungkinkan penyesuaian tertentu untuk memastikan efisiensi desain tanpa mengorbankan ketahanan. Dengan pendekatan ini, SNI 1726:2019 memastikan bahwa efek tanah lokal diperhitungkan secara akurat dalam perencanaan struktur tahan gempa.

Untuk menentukan nilai Ss (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) penulis menggunakan data dari website Desain Spektra Indonesia dari PUPR dan melakukan interpolasi sehingga didapatkan nilai Ss = 0,9163.



Gambar 4.1 Menentukan Nilai Ss dari *Website* Desain Spektra Indonesia

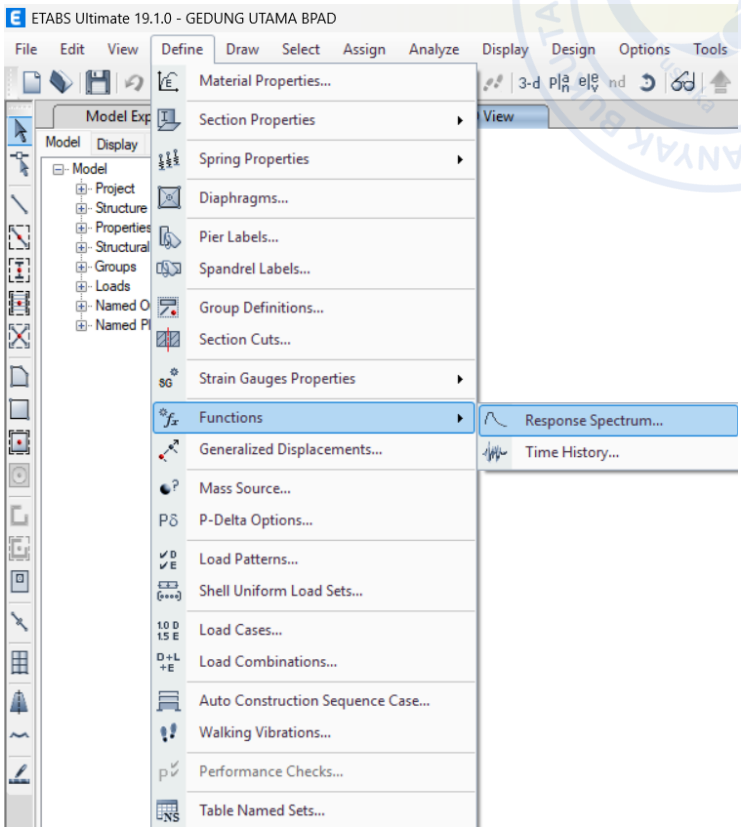
Berdasarkan lokasi koordinat proyek gedung kantor 26 lantai ini, maka dari itu, penulis menyimpulkan bahwa parameter respons spektrum desain yang digunakan ditampilkan seperti gambar di bawah.



PGA	=	0.405	S1	=	0.3878	Sds	=	0.69
SS	=	0.9163	TL	=	6	Sd1	=	0.490

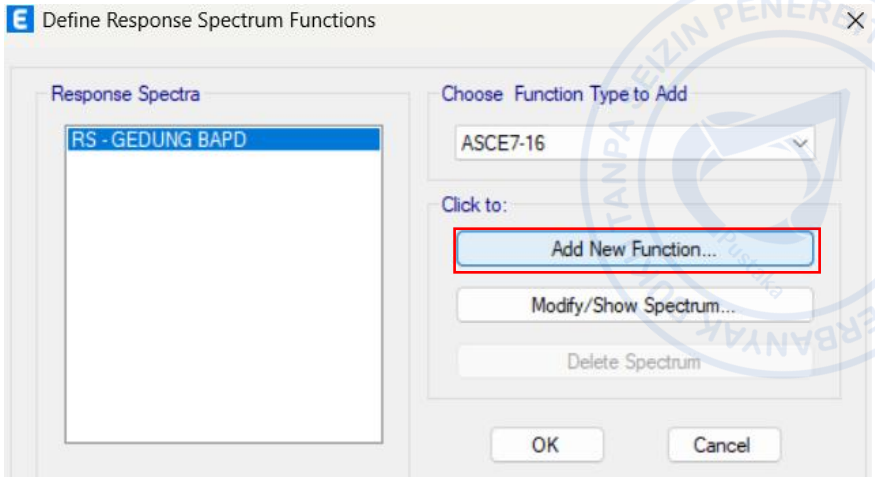
Gambar 4.2 *Summary* Parameter Respons Spektrum
(Sumber: www.rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021)

Setelah itu, data-data tersebut bisa langsung diinput pada respons spektrum di *software* ETABS. Caranya adalah klik menu *Define* → *Functions* → *Response Spectrum*.

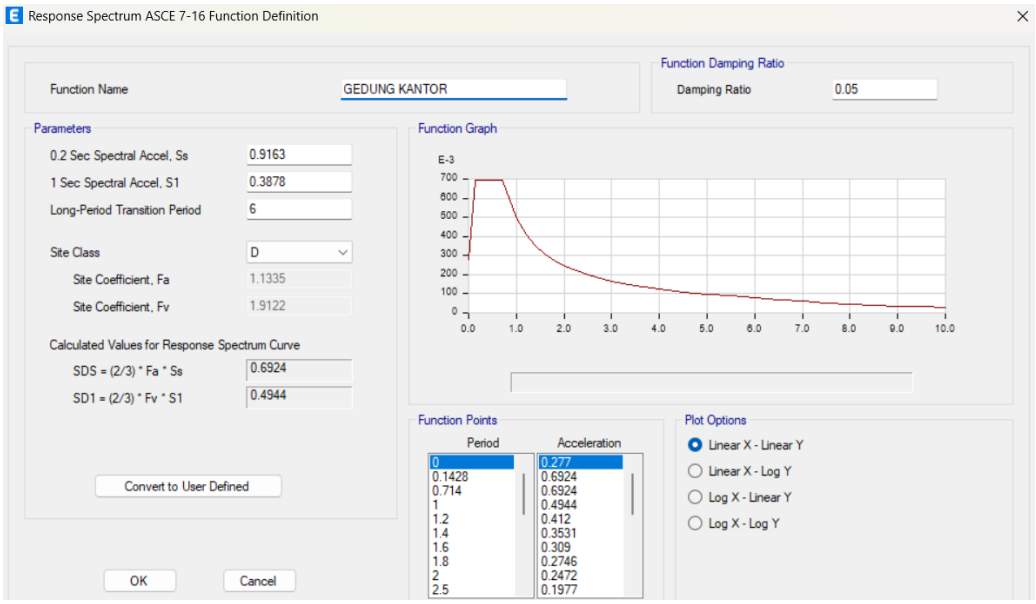


Gambar 4.3 *Define Functions Response Spectrum*

Penting untuk diketahui bahwa SNI 1726:2019 merupakan adopsi dari standar ASCE7-16 dengan beberapa modifikasi yang disesuaikan dengan kondisi seismik dan geoteknik di Indonesia, seperti penerapan Peta Gempa Indonesia tahun 2017. Standar ini menggantikan SNI 1726:2012 yang sebelumnya diadopsi dari ASCE 7-10, sehingga pembaruan pada 2019 mencerminkan perkembangan terbaru dalam regulasi seismik internasional untuk meningkatkan ketahanan struktur terhadap gempa bumi.



Gambar 4.4 *Define Response Spectrum Functions*



Gambar 4.5 *Input Response Spectrum Functions Parameters*

Nilai koefisien situs (Fa dan Fv) untuk kelas situs D sudah otomatis dihitung oleh *software*, jadi penulis tidak memasukkannya secara manual. Akan tetapi, penting untuk diketahui, jika ingin memasukkan nilai Fa dan Fv pada *software* yang tidak terhitung otomatis adalah dengan merujuk pada Tabel 6 dan 7 SNI 1726:2019 seperti di bawah.

Tabel 4.7
Koefisien Situs (Fa)

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, T = 0,2 detik, S_s					
	$S_s \leq 0{,}25$	$S_s = 0{,}5$	$S_s = 0{,}75$	$S_s = 1{,}0$	$S_s = 1{,}25$	$S_s \geq 1{,}5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS[a]					

CATATAN:
(a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 0

Tabel 4.8
Koefisien Situs (Fv)

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0{,}1$	$S_1 = 0{,}2$	$S_1 = 0{,}3$	$S_1 = 0{,}4$	$S_1 = 0{,}5$	$S_1 \geq 0{,}6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS[a]					

CATATAN:
(a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 0

3. Penentuan Kategori Desain Seismik

Kategori Desain Seismik (KDS) dalam SNI 1726:2019 merupakan klasifikasi yang digunakan untuk menentukan tingkat persyaratan desain tahan gempa pada struktur bangunan gedung dan nongedung. KDS ini mencerminkan tingkat bahaya seismik di suatu lokasi, yang dibagi menjadi enam kategori yaitu A hingga F, di mana A menunjukkan risiko rendah dan F risiko tinggi. Penentuan KDS bertujuan untuk memastikan struktur dapat menahan guncangan gempa dengan probabilitas tertentu, berdasarkan peta *hazard* gempa Indonesia 2017. Faktor utama dalam penentuan ini meliputi parameter percepatan spektral desain serta kategori risiko bangunan, yang memengaruhi pemilihan sistem struktur dan detail desain.

Implikasi dari penentuan KDS adalah persyaratan desain yang semakin ketat seiring meningkatnya kategori, seperti penggunaan sistem rangka pemikul momen khusus untuk KDS D ke atas guna meningkatkan daktilitas struktur. SNI 1726:2019 menekankan investigasi geoteknik mendalam untuk KDS D, E, dan F,

termasuk penilaian potensi likuefaksi tanah. Hal ini memastikan bangunan tidak hanya bertahan dari gempa desain tetapi juga meminimalkan kerusakan, sesuai dengan prinsip *risk-targeted maximum considered earthquake* (MCER). Penggunaan *tools* seperti aplikasi Desain Spektra Indonesia membantu dalam perhitungan akurat parameter ini.

Untuk menentukan Kategori Desain Seismik (KDS), bisa dilihat pada SNI 1726:2019 Tabel 8 dan 9 di bawah.

Tabel 4.9
Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (S_{DS})

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0{,}167$	A	A
$0{,}167 \le S_{DS} < 0{,}33$	B	C
$0{,}33 \le S_{DS} < 0{,}50$	C	D
$0{,}50 \le S_{DS}$	D	D

Tabel 4.10
Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik (S_{D1})

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0{,}067$	A	A
$0{,}067 \le S_{D1} < 0{,}133$	B	C
$0{,}133 \le S_{D1} < 0{,}20$	C	D
$0{,}20 \le S_{D1}$	D	D

B. Pemilihan Sistem Struktur

Penentuan sistem struktur untuk *high rise building* menurut SNI 1726:2019 didasarkan pada Kategori Desain Seismik (KDS) yang telah ditentukan sebelumnya, dengan tujuan memastikan ketahanan terhadap gaya lateral seperti gempa. *High rise building*, yang umumnya didefinisikan sebagai gedung bertingkat tinggi lebih dari 8 lantai atau ketinggian struktural di atas 24 meter, memerlukan pemilihan sistem struktur yang mampu menahan beban seismik secara efektif. SNI 1726:2019 mengadopsi pendekatan serupa dengan ASCE 7-16, di mana sistem struktur diklasifikasikan berdasarkan faktor respons modifikasi (R), faktor *overstrength* (Ω0), dan faktor defleksi amplifikasi (Cd). Pemilihan ini juga mempertimbangkan faktor

seperti kategori risiko bangunan (I-IV), kondisi situs tanah, dan batasan ketinggian struktur untuk mencegah kegagalan pada KDS tinggi seperti D, E, atau F.

Kriteria pemilihan sistem struktur melibatkan penilaian KDS, di mana untuk KDS A hingga C (risiko rendah hingga sedang), hampir semua sistem diizinkan tanpa batasan ketinggian signifikan, sementara untuk KDS D hingga F (risiko tinggi), ada batasan ketinggian ketat. Misalnya, pada kasus ini menggunakan sistem ganda, yaitu kombinasi SRPMK dan *Shear Wall*. Batasan ini tercantum dalam Tabel 12 SNI 1726:2019 seperti ditunjukkan di bawah.

SNI 1726:2019 menggolongkan sistem struktur utama menjadi enam kategori utama untuk bangunan tahan gempa, yaitu: (1) Sistem Dinding Penumpu (*Bearing Wall System*), (2) Sistem Rangka Gedung (*Building Frame System*), (3) Sistem Rangka Pemikul Momen (*Moment-Resisting Frame System*), (4) Sistem Ganda (*Dual System*), (5) Sistem Interaksi Dinding Geser dan Rangka (*Shear Wall-Frame Interaction System*), dan (6) Sistem Kolom Kantilever (*Cantilever Column System*). Untuk *high rise building*, sistem seperti Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) atau Sistem Ganda dengan dinding geser khusus sering direkomendasikan, terutama pada daerah risiko gempa tinggi.

Untuk sistem ganda, rangka pemikul momen harus mampu memikul paling sedikit 25 % gaya seismik desain. Tahanan gaya seismik total harus disediakan oleh kombinasi rangka pemikul momen dan dinding geser atau rangka *bresing*, dengan distribusi yang proporsional terhadap kekakuannya.

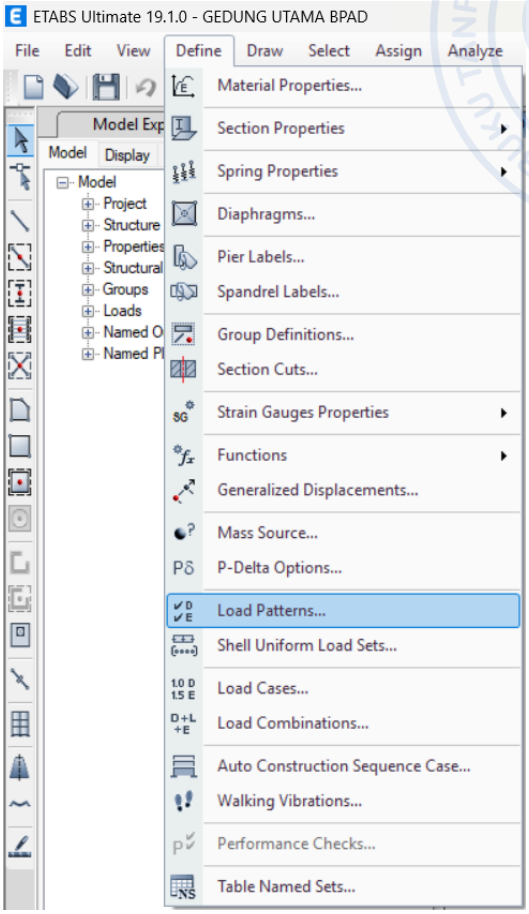
Tabel 4.11

Faktor R, Cd, dan Ω0 untuk Sistem Ganda

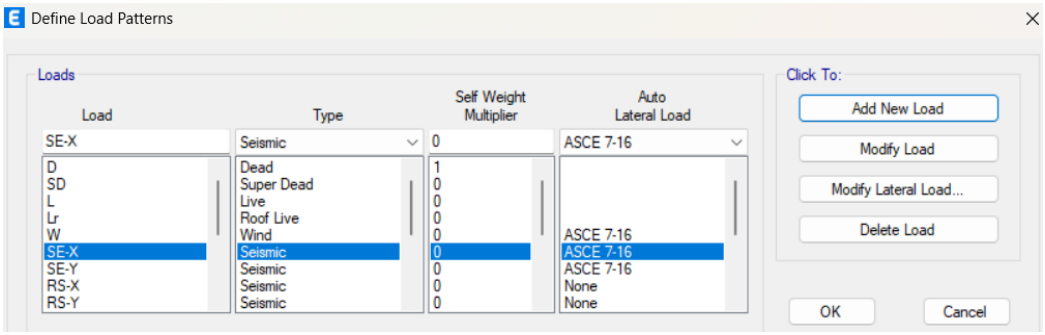
Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0{}^b$	Faktor pembesaran defleksi, $C_d{}^c$	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)[d]				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D[e]	E[e]	F[f]
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus[g,h]	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa[g]	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB

Jika sudah mendapatkan nilainya, maka selanjutnya memasukkan nilai-nilai tersebut pada *software* ETABS. Caranya klik menu *Define* → *Load Pattern* → *Add*

New Load → berikan nama SE-X untuk arah X dan SE-Y untuk arah Y → Sesuaikan seperti gambar di bawah.



Gambar 4.6 Mendefinisikan Pola Pembebanan

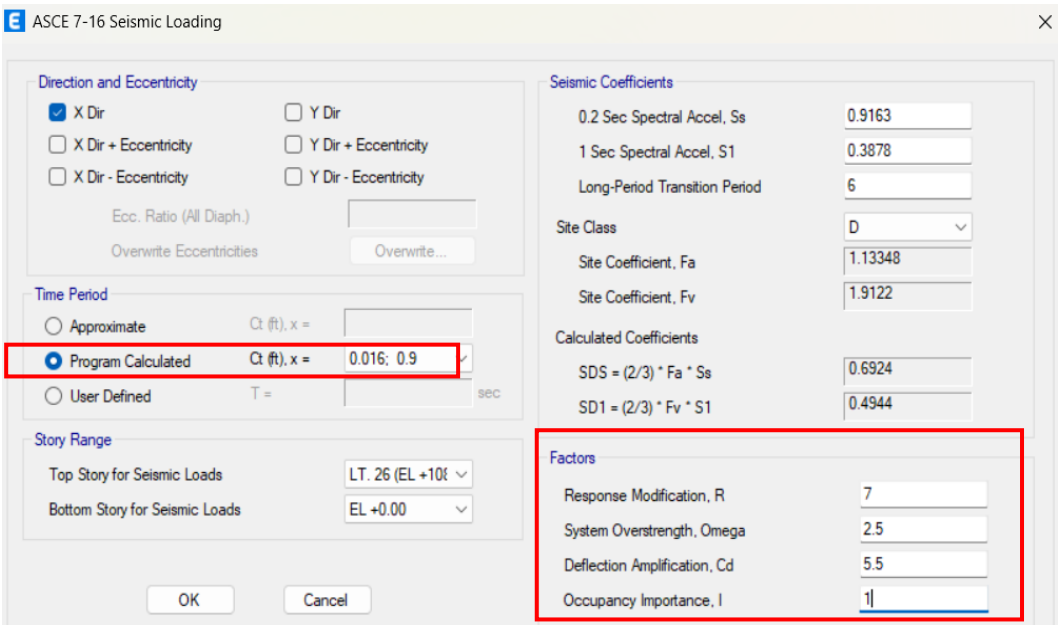


Gambar 4.7 Mendefinisikan Pola untuk Beban Gempa

Berdasarkan Tabel 18 SNI 1726:2019, nilai parameter periode pendekatan (Ct dan x) bisa ditentukan seperti yang ditunjukkan tabel di bawah ini.

Tabel 4.12
Nilai Parameter Periode Pendekatan

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75



Gambar 4.8 Input Nilai Faktor R, Cd, dan Ω0

1. Perhitungan Periode Struktur

Perhitungan periode struktur menurut SNI 1726:2019 merupakan langkah krusial dalam desain tahan gempa untuk menentukan respons spektrum dan koefisien seismik Cs. Periode fundamental (T) mencerminkan waktu getar alami struktur, yang memengaruhi besarnya gaya lateral gempa. SNI ini mengadopsi pendekatan dari ASCE 7-16, dengan dua metode utama: pendekatan empiris untuk periode aproksimasi (Ta) dan analisis dinamis untuk nilai yang lebih akurat. Tujuan perhitungan ini adalah memastikan struktur berada dalam rentang periode yang aman, menghindari resonansi dengan guncangan gempa, terutama di wilayah berisiko tinggi seperti Indonesia. Parameter kunci meliputi tinggi struktur (hn), jenis sistem struktur, dan kondisi situs tanah yang memengaruhi amplifikasi.

Metode pendekatan untuk Ta menggunakan rumus Ta = Ct*hn^x, di mana hn adalah ketinggian struktur dari dasar hingga puncak (dalam meter), Ct adalah koefisien tergantung jenis struktur (misalnya 0,0466 untuk rangka momen khusus beton bertulang), dan x adalah eksponen (umumnya 0,9 untuk sistem tersebut).

Untuk akurasi lebih tinggi, periode T dihitung melalui analisis modal dinamis menggunakan *software* seperti ETABS, yang memodelkan massa, kekakuan, dan distribusi beban struktur. Namun, ada batasan; periode dari analisis tidak boleh kurang dari 80% Ta untuk beberapa kasus, dan tidak melebihi Cu*Ta sebagai batas atas, di mana Cu adalah koefisien dari Tabel 17 SNI 1726:2019 berdasarkan SD1 (misalnya Cu = 1,4 untuk SD1 = 0,2-0,3 g). Jika T > Cu*Ta, maka digunakan Cu*Ta untuk menghitung Cs minimum guna menghindari *underestimation* gaya. Pada KDS D ke atas, analisis dinamis wajib untuk struktur *irregular* atau tinggi, dengan verifikasi partisipasi massa minimal 90%.

Tabel 4.13
Nilai Cu

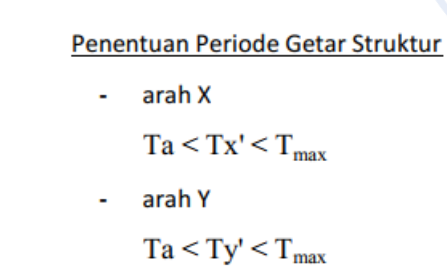
Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
≥ 0,4	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
≤ 0,1	1,7

Tabel 4.14
Nilai Periode Struktur yang Digunakan

Percepatan Desain Periode 1 Detik	S_{D1}	=	0.4944	g
Koefisien untuk Batas Periode	C_u	=	1.4	
SNI 1726:2019 tabel 17				
Parameter Periode Pendekatan	C_t	=	0.0466	
SNI 1726:2019 tabel 18				
Parameter Periode Pendekatan	x	=	0.9	
SNI 1726:2019 tabel 18				
Tinggi Bangunan (Seismik)	h	=	108.2	m
Periode Fundamental Pendekatan	T_a	=	$C_t * (h^x)$	
SNI 1726:2019 persamaan 36		=	3.1564	detik
Periode Maksimum	T_{max}	=	$C_u * T_a$	
SNI 1726:2019 pasal 7.8.2		=	4.419	detik
Periode Hasil Analisis Arah X	$T_{c,X}$	=	0.6544	detik
Periode Hasil Analisis Arah Y	$T_{c,Y}$	=	0.6603	detik
Periode Pakai Arah X (by ETABS)	T_X	=	3.353	detik
Periode Pakai Arah Y (by ETABS)	T_Y	=	3.069	detik

Tabel 4.15
Nilai Periode Getar Struktur (Tx dan Ty) dari ETABS

Case	Mode	Period sec
Modal	1	3.353
Modal	2	3.069



Gambar 4.9 Menentukan Periode Getar Struktur

2. Perhitungan Berat Seismik Efektif

Perhitungan berat seismik efektif (W) menurut SNI 1726:2019 merupakan bagian penting dalam analisis desain tahan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung, sebagaimana diatur pada Pasal 7.7.2. Berat seismik efektif ini mewakili massa struktur yang berkontribusi terhadap inersia selama guncangan gempa, digunakan untuk menghitung gaya geser dasar seismik (V) melalui rumus V = Cs*W, di mana Cs adalah koefisien respons seismik. Tujuannya adalah memperkirakan beban lateral seismik secara akurat, memastikan struktur dapat menahan gempa desain dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (MCER). Perhitungan ini mempertimbangkan kombinasi beban mati dan sebagian beban hidup yang kemungkinan hadir saat gempa terjadi, sesuai dengan adaptasi dari ASCE 7-16.

Implikasi dari perhitungan berat seismik efektif ini adalah peningkatan ketahanan struktur terhadap gempa, terutama di wilayah seismik tinggi Indonesia, dengan integrasi ke metode analisis seperti statik ekivalen atau *response spectrum*. Kesalahan dalam estimasi W dapat menyebabkan *underdesign* atau *overdesign*, sehingga direkomendasikan verifikasi melalui *software* ETABS. SNI 1726:2019 juga merujuk pada standar terkait seperti SNI 2847:2019 untuk beton, memastikan konsistensi desain. Penggunaan aplikasi Desain Spektra Indonesia membantu dalam menentukan parameter pendukung, *ultimately* mendukung prinsip *risk-targeted design*.

Berat seismik efektif struktur, W, harus menyertakan seluruh beban mati dan beban lainnya yang terdaftar di bawah ini:

1. Dalam daerah yang digunakan untuk penyimpanan: minimum sebesar 25 % beban hidup lantai

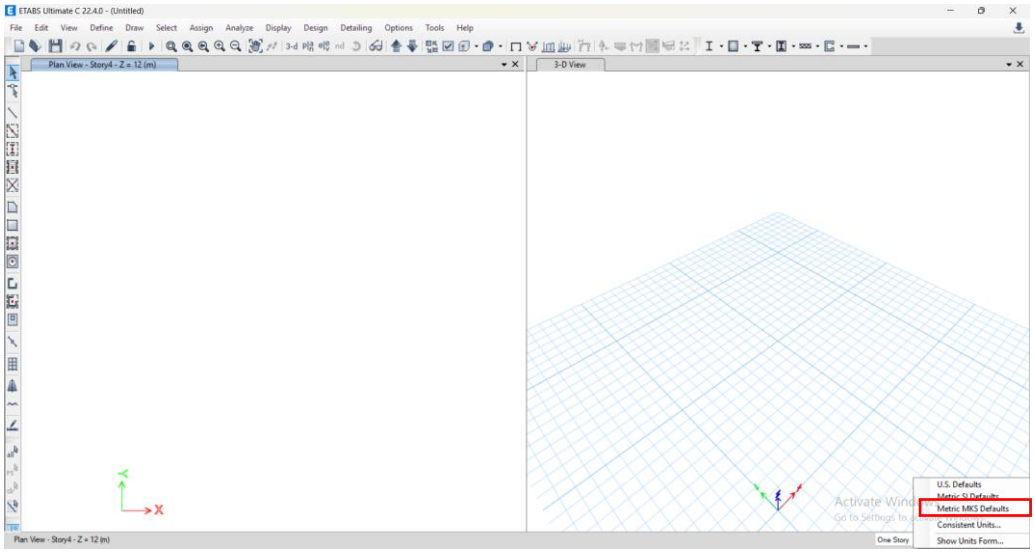
   PENGECUALIAN

   a. Bila beban penyimpanan tidak lebih dari 5 % terhadap berat seismik efektif pada tingkat tersebut, beban tidak perlu dimasukkan dalam berat seismik efektif.
   b. Beban hidup lantai di tempat parkir umum dan struktur parkir terbuka tidak perlu dimasukkan.

2. Jika ketentuan desain beban lantai untuk partisi disyaratkan SNI 1727 pasal 4.3.2, sebesar beban terbesar antara berat partisi aktual atau berat daerah lantai minimum sebesar 0,48 kN/m^2;
3. Berat operasional total dari peralatan yang permanen;
4. Berat lanskap dan beban lainnya pada taman atap dan area sejenis.

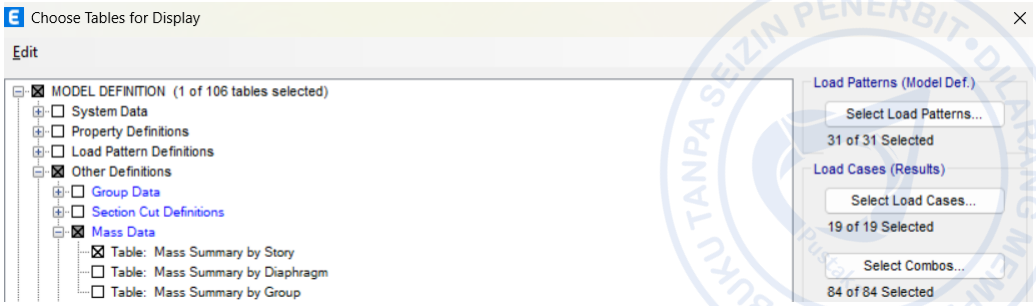
Gambar 4.10 Ketentuan Berat Seismik Efektif
(Sumber: Pasal 7.7.2 SNI 1726:2019)

Jangan lupa untuk menyesuaikan satuan/unit yang akan digunakan untuk menampilkan massa tiap lantai.



Gambar 4.11 Menyesuaikan Penggunaan Satuan

Setelah itu kita harus melakukan *running* pada model kita dengan menekan tombol F5. Lalu cara untuk mendapatkan berat seismik efektif dari *software* ETABS adalah dengan klik Ctrl + T → *Model Definition* → *Other Definitions* → *Mass Data* → *Mass Summary by Story*.



Gambar 4.12 *Choose Tables for Display*

Tabel 4.16

Mass Summary by Story

Mass Summary by Story

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: None

Story	UX kg	UY kg	UZ kg
LT. ATAP (EL ...	593431.78	593431.78	0
LT. 26 (EL +10...	2154569.31	2154569.31	0
LT. 25 (EL 104...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 24 (EL +99...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 23 (EL +95...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 22 (EL +91...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 21 (EL +87...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 20 (EL +83...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 19 (EL +78...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 18 (EL +74...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 17 (EL +70...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 16 (EL 66....	1926908.49	1926908.49	0
LT. 15 (EL +62...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 14 (EL +57...	1926908.49	1926908.49	0
LT. 13 (EL +53...	1932959.15	1932959.15	0
LT. 12 (EL 49....	1940080.3	1940080.3	0
LT. 11 (EL +45...	1940080.3	1940080.3	0
LT. 10 (EL +41...	1940080.3	1940080.3	0
LT. 9 (EL +36....	1940080.3	1940080.3	0
LT. 8 (EL 32.60)	1979386.3	1979386.3	0
LT. 7 (EL 28.40)	2023579.36	2023579.36	0
LT. 6 (EL +24....	2023579.36	2023579.36	0
LT. 5 (EL +20....	2085658.95	2085658.95	0
LT. 4 (EL +15....	1997161.19	1997161.19	0
LT. 3 (EL +11....	1969172.41	1969172.41	0
LT. 2 (EL +7.40)	2573828.15	2573828.15	0
EL +0.00	1159151.78	1159151.78	0

Tabel 4.17
Perhitungan Berat Seismik Efektif

Koefisien Respons Seismik	C_s	=	$S_{DS} / (R/I_e)$	
SNI 1726:2019 persamaan 31		=	0.0989	
Batas Atas	$C_{s,max}$	=	$S_{D1} / [T * (R/I_e)]$	
SNI 1726:2019 persamaan 32	$C_{s,max,X}$	=	0.0211	
	$C_{s,max,Y}$	=	0.0230	
Batas Bawah	$C_{s,min,1}$	=	$0.044 S_{DS} I_e >= 0.01$	
SNI 1726:2019 persamaan 34		=	0.0305	
Batas Bawah (dipakai jika S_1 >= 0,6 g)	$C_{s,min,2}$	=	$0.5 S_1 / (R/I_e)$	
SNI 1726:2019 persamaan 35		=	0.0277	
Koefisien Respons Seismik Pakai	$C_{s,pakai,X}$	=	0.0305	
	$C_{s,pakai,Y}$	=	0.0305	
Berat Seismik Efektif	W	=	492456	kN

Perlu diketahui bahwa massa yang dihitung hanya massa lantai 2 sampai 26 saja, sedangkan massa lantai dasar tidak perlu dihitung.

3. Penentuan *Base Shear* dan Distribusi Gaya Lateral

Distribusi gaya lateral menurut SNI 1726:2019 dilakukan untuk membagi gaya geser dasar seismik (*base shear*, V) ke setiap tingkat struktur berdasarkan karakteristik dinamiknya, seperti periode fundamental (T), tinggi struktur, dan distribusi massa. Prosedur ini mengacu pada Pasal 7.8.1 dan 7.8.1.1 SNI 1726:2019, yang diadaptasi dari ASCE 7-16, dan biasanya menggunakan metode statik ekivalen untuk struktur sederhana atau analisis dinamis untuk struktur kompleks.

Gaya geser dasar seismik, V, dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s W \quad (30)$$

Keterangan:
C_s = koefisien respons seismik yang ditentukan sesuai dengan 0
W = berat seismik efektif menurut 0

Gambar 4.13 Persamaan Gaya Geser Dasar Seismik

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \qquad (31)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan respons spektral desain dalam rentang periode pendek seperti ditentukan dalam 0 atau 0

R = koefisien modifikasi respons dalam Tabel 12

I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 0.

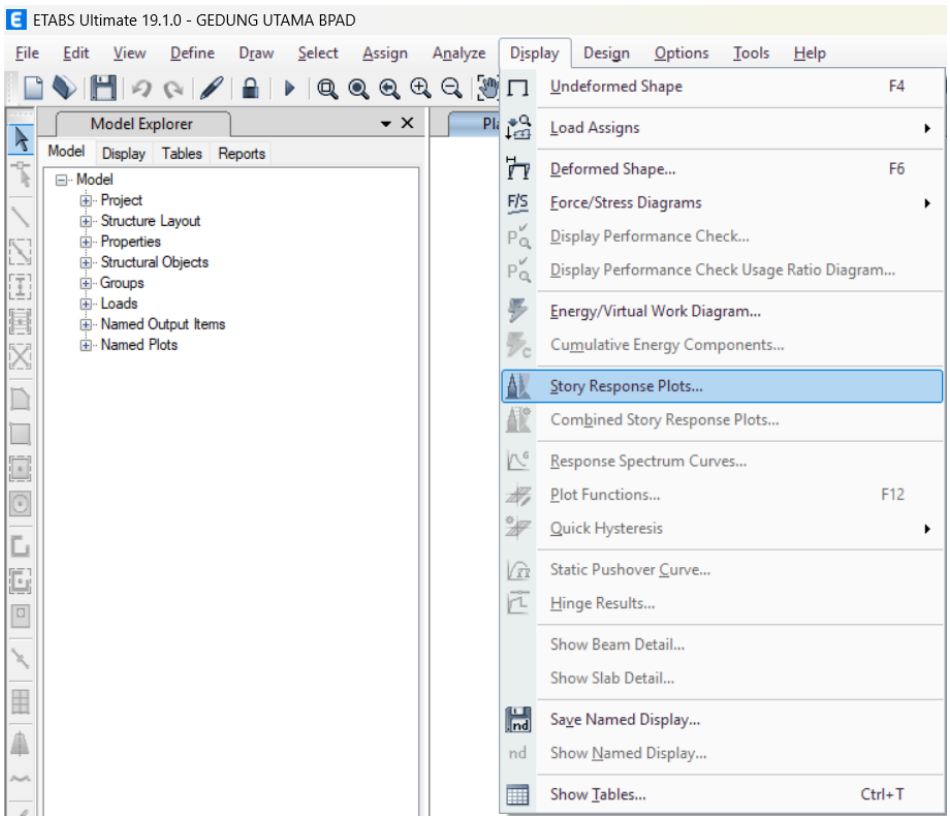
Gambar 4.14 Persamaan Koefisien Respons Seismik

Tabel 4.18

Perhitungan Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya Geser Statik (Manual)	V	=	$C_s * W$	
SNI 1726:2019 persamaan 30	V_X	=	15003.08	kN
	V_Y	=	15003.08	kN
Gaya Geser Statik (ETABS)	V_X	=	19989.243	kN
(hanya untuk pembanding)	V_Y	=	21834.526	kN

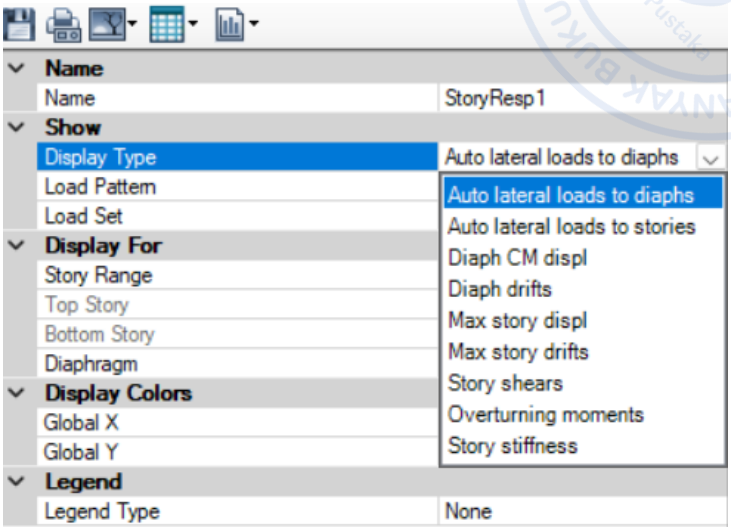
Untuk memunculkan diagram distribusi gaya lateral pada ETABS adalah dengan cara klik menu *Display* → *Story Respons Plots*.

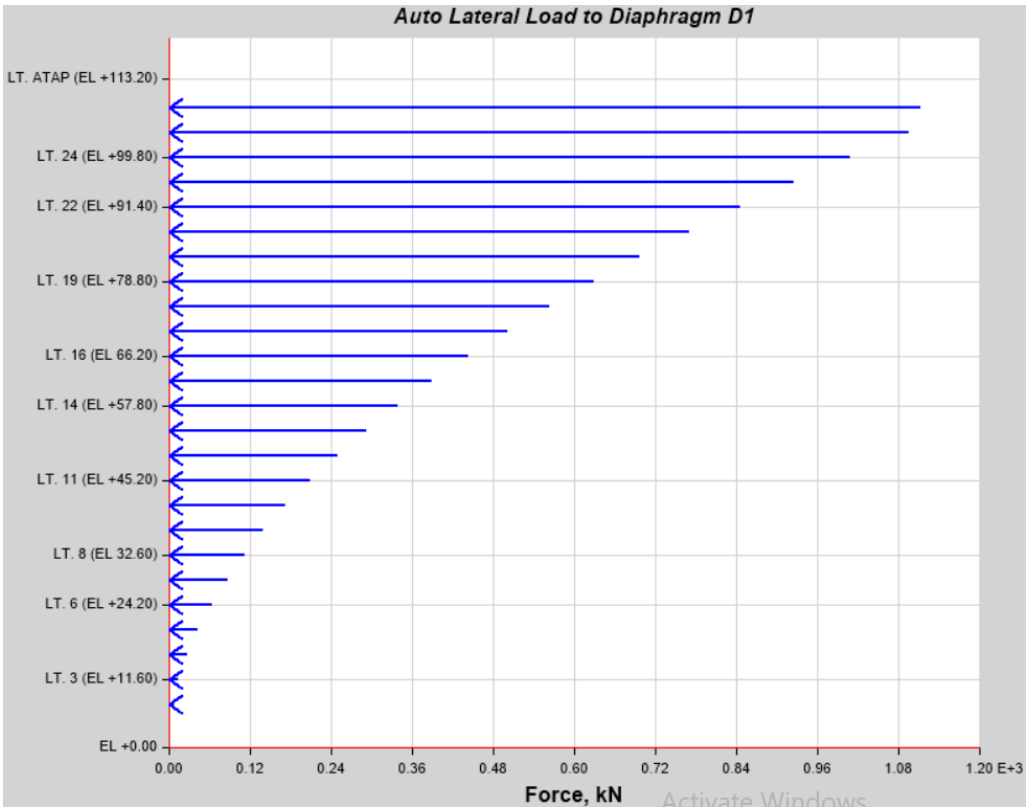


Gambar 4.15 *Display Story Respons Plots*

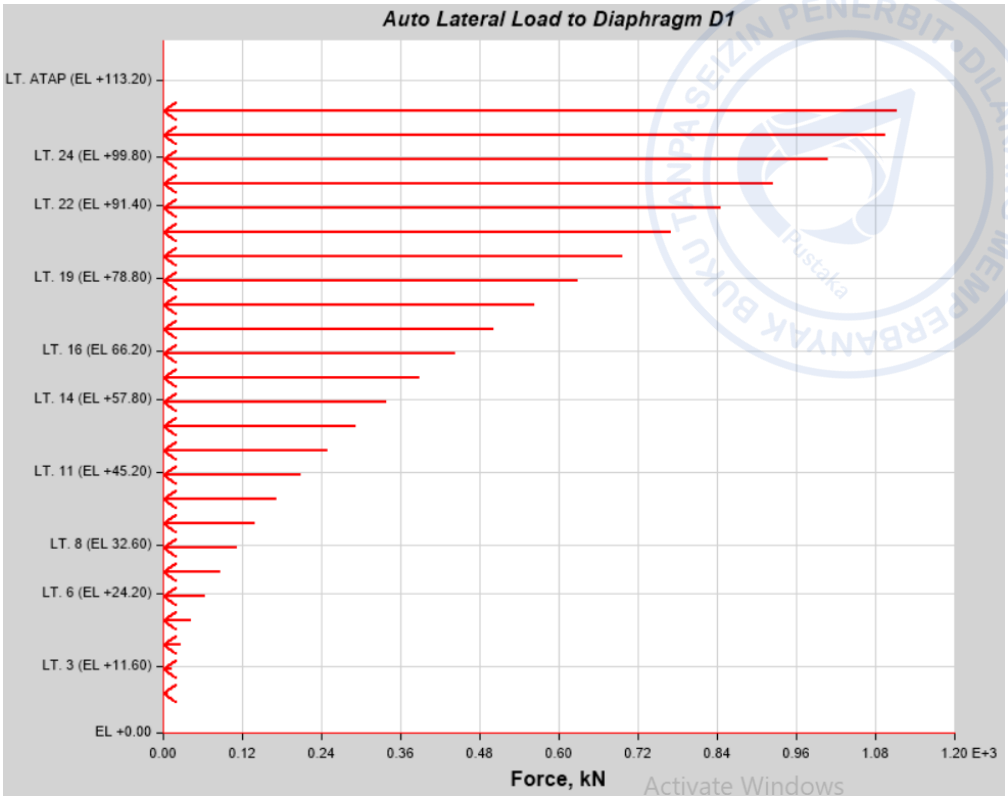
Setelah itu, kita memilih pada opsi *Show* → *Auto Lateral Loads to Diaphs*, lalu opsi *Load Pattern* pilih yang SE-X dan SE-Y.

Tabel 4.19
Memunculkan Gaya *Auto Lateral*





Gambar 4.16 *Auto Lateral Load to Diaphragm D1 (Load Pattern SE-X)*



Gambar 4.17 *Auto Lateral Load to Diaphragm D1 (Load Pattern SE-Y)*

4. Penskalaan Gaya

Faktor skala awal, sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.2, merujuk pada koefisien yang digunakan untuk menyesuaikan spektrum respons desain awal dalam analisis spektrum respons ragam (*response spectrum analysis*). Faktor ini diterapkan untuk memastikan bahwa hasil analisis mencerminkan karakteristik dinamik struktur bangunan secara realistis, dengan mempertimbangkan efek nonlinier dan faktor redaman (damping) yang sesuai dengan ketentuan standar. Dalam konteks ini, faktor skala awal bertujuan untuk menyesuaikan gaya-gaya seismik yang dihitung agar sesuai dengan gaya desain minimum yang ditetapkan dalam prosedur gaya lateral ekivalen, sebagaimana dijelaskan pada pasal-pasal terkait dalam SNI 1726:2019.

Penerapan faktor skala awal ini sangat penting dalam desain seismik bangunan, terutama untuk struktur dengan karakteristik dinamik yang kompleks. Dengan memastikan bahwa gaya geser dasar tidak jatuh di bawah ambang batas tertentu, SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.2 membantu para insinyur dalam merancang bangunan yang mampu menahan guncangan gempa dengan lebih baik. Selain itu, penggunaan faktor skala awal juga memperhitungkan variasi kondisi situs dan parameter seismik lainnya, seperti percepatan spektral desain (SDS dan SD1),

yang diatur dalam pasal-pasal sebelumnya, sehingga desain tetap sesuai dengan kondisi geoteknik dan seismik setempat.

Sebelum melakukan penskalaan gaya (biasanya dilakukan setelah terlebih dahulu melakukan *running* pada ETABS), kita harus mengetahui faktor skala awal yang harus dimasukkan pada bagian *load cases* di ETABS. Pada umumnya dilakukan pada gaya gempa dinamik/*response spectrum*. Untuk mengetahui berapa nilai faktor skala awal bisa dilihat pada SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.2.

7.9.1.2 Parameter respons ragam

Nilai untuk masing-masing parameter desain terkait gaya yang ditinjau, termasuk simpangan antar tingkat, gaya dukung, dan gaya elemen struktur individu untuk masing-masing ragam respons harus dihitung menggunakan properti masing-masing ragam dan spektrum respons didefinisikan dalam 0 atau 0 dibagi dengan kuantitas (R/I_e). Nilai untuk perpindahan dan kuantitas simpangan antar tingkat harus dikalikan dengan kuantitas (C_d/I_e).

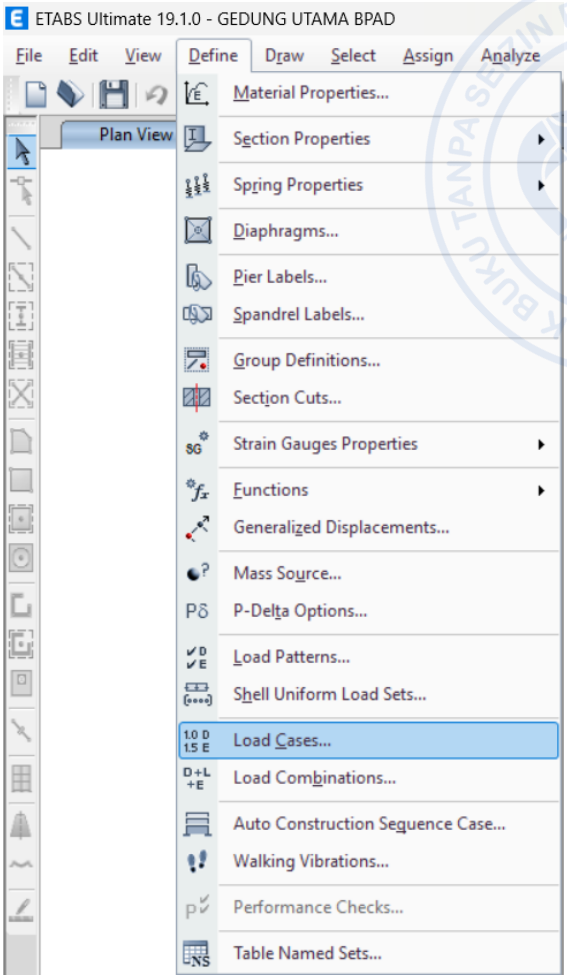
Gambar 4.18 Pasal 7.9.1.2 SNI 1726:2019

Setelah itu, kita harus menghitung besar nilai faktor skala awalnya berdasarkan referensi tersebut di atas, biasanya menggunakan rumus g/(R/I), dengan g adalah nilai gravitasi 9806,65 mm/s2 atau 9.80665 m/s2. Di bawah ini adalah hasil perhitungan faktor skala awal dengan nilai I dan R telah ditunjukkan pada Tabel 4.1.

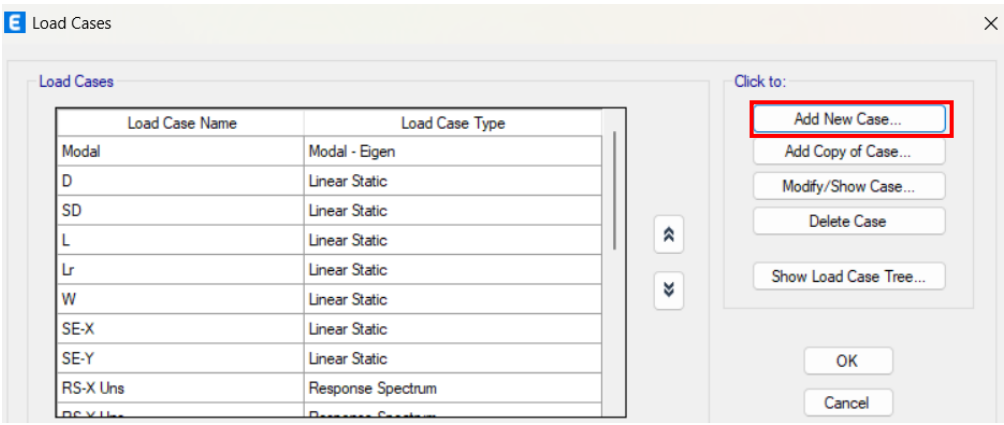
Tabel 4.20
Perhitungan Faktor Skala Awal

Faktor Skala Awal	*SF*	=	*g / (R / I)*	
		=	9.80665/(7/1)	
SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.2		=	1.40095	m/s^2
		=	1400.95	mm/s^2

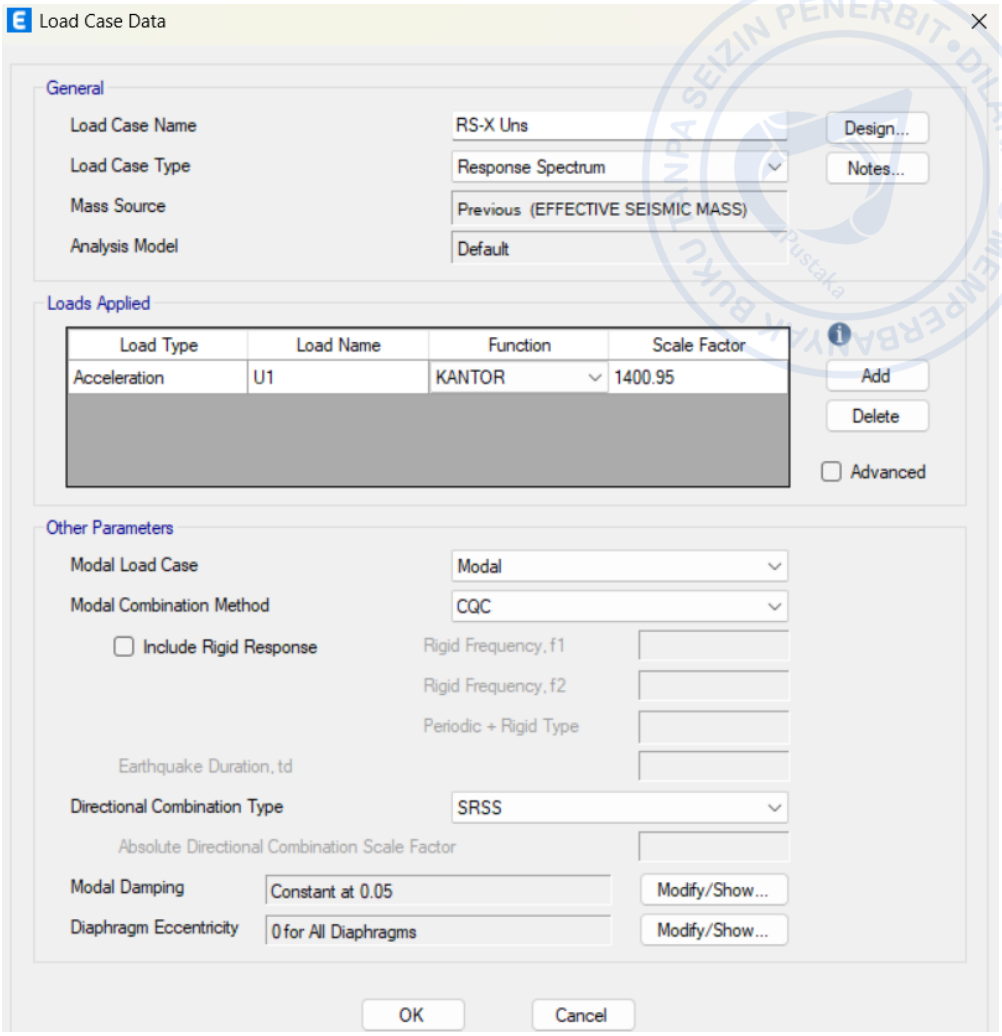
Lalu kita bisa memasukkan angka tersebut pada *software* ETABS. Caranya adalah dengan klik menu *Define → Load Cases → Add New Case*, lalu berikan nama RS - X Uns dani RS - Y Uns karena belum diskalakan (*unscale*).



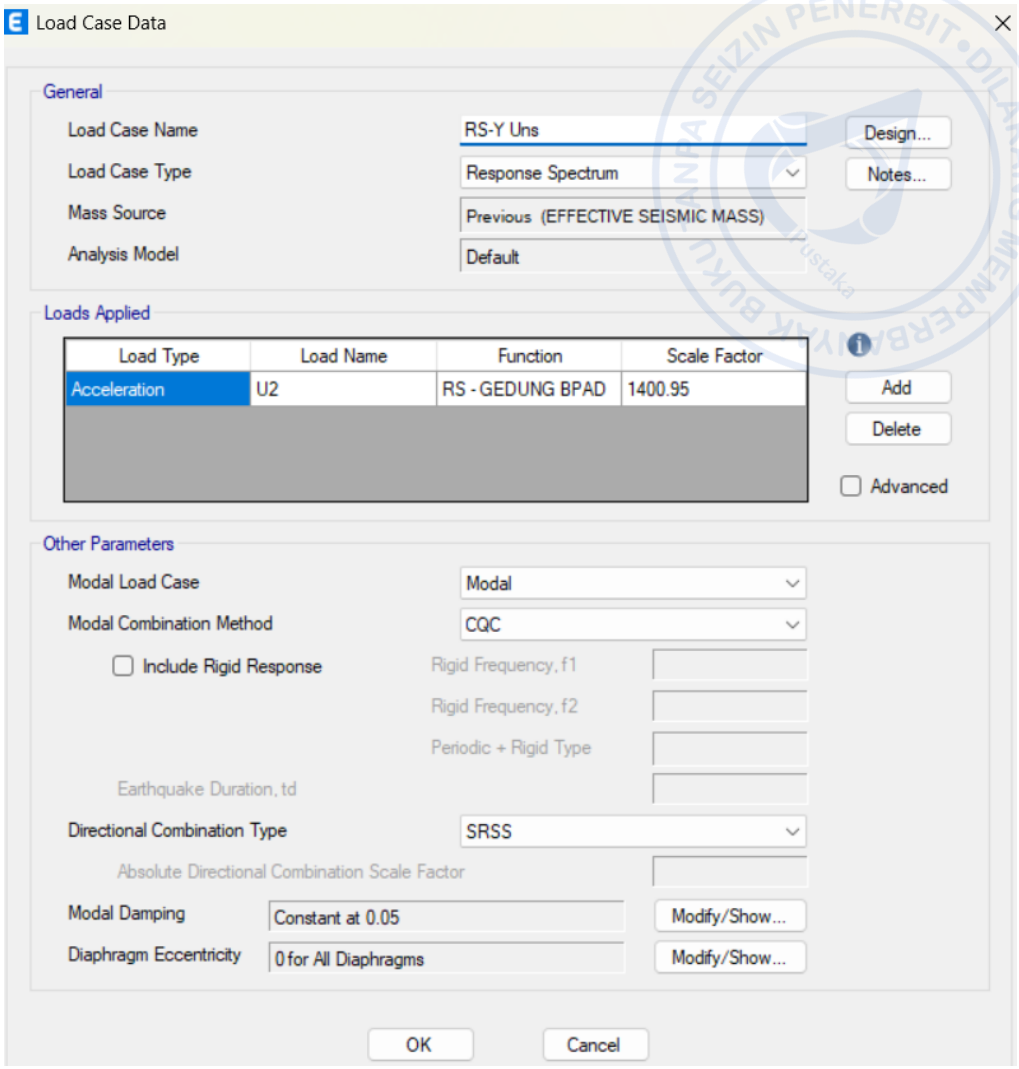
Gambar 4.19 *Define Load Cases*



Gambar 4.20 *Add New Cases*

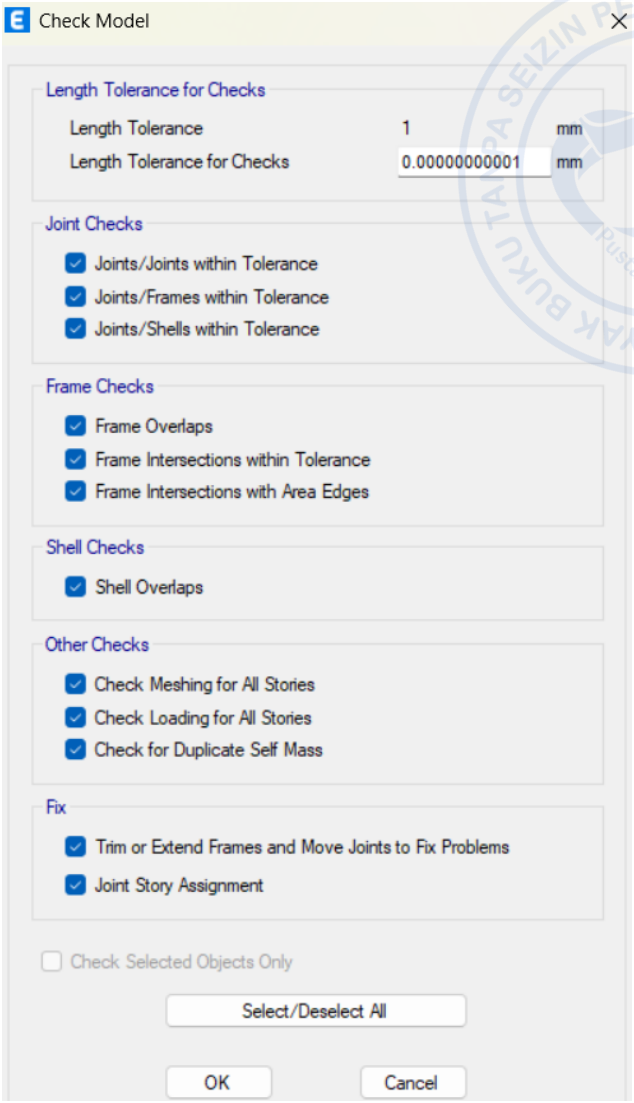


Gambar 4.21 *Load Cases Data for RS -X Uns*



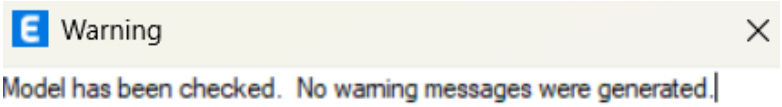
Gambar 4.22 *Load Cases Data for RS -Y Uns*

Setelah kita memasukkan nilai faktor skala awal dan telah melakukan semua penginputan beban, selanjutnya kita harus melakukan pengecekan struktur bangunan yang telah dimodelkan. Caranya adalah dengan klik menu *Analyze* → *Check Model* → *Length Tolerance for Checks* 0.00000000001 mm → Centang Semua → klik *OK*. Langkah ini adalah langkah penting sebelum kita melakukan desain penulangan pelat lantai, balok, kolom, dan *shear wall*. Lakukan seperti yang ditunjukkan gambar di bawah.



Gambar 4.23 *Check Model*

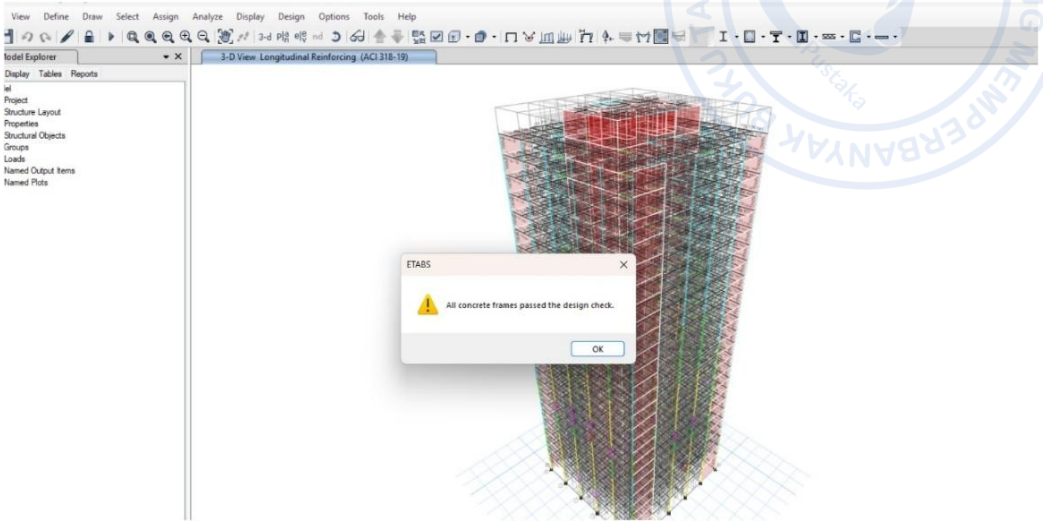
Pastikan tidak ada *warning message* setelah kita melakukan *check* model tersebut. Dan jika ada *warning message*, maka kita harus memperbaiki desain kita.



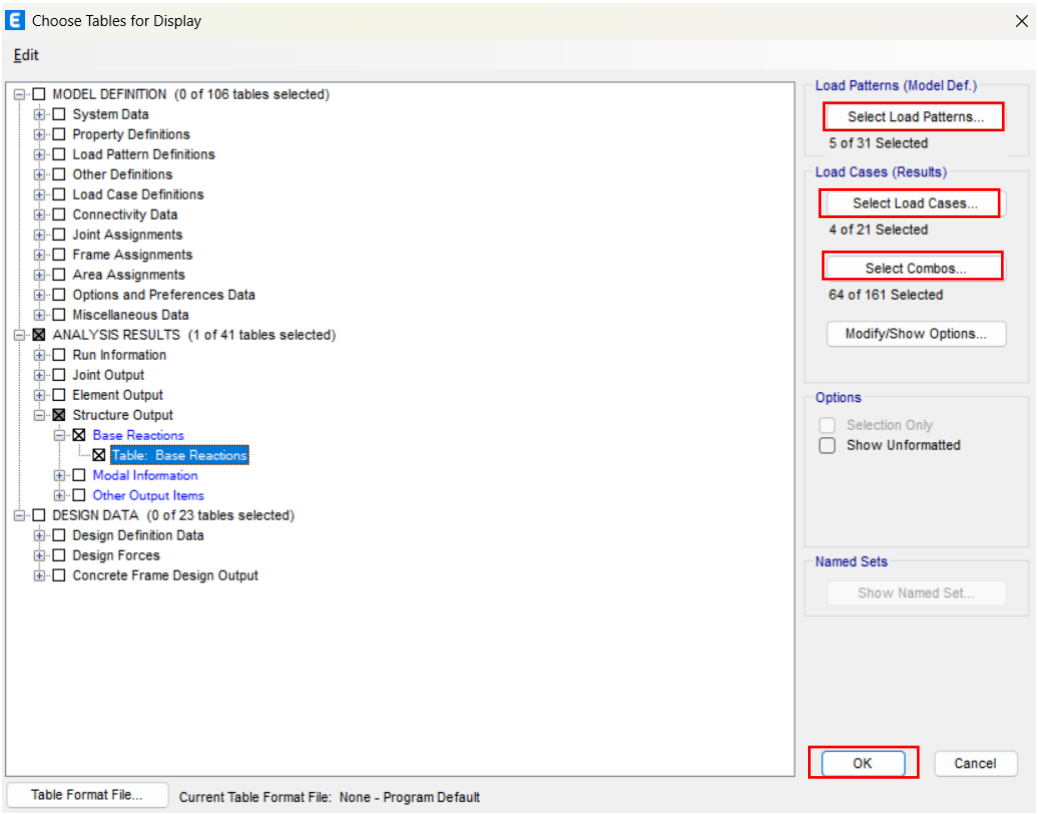
Gambar 4.24 *No Warning Message After Doing Check Model*

Lalu kita melakukan *running* terhadap struktur gedung yang telah dimodelkan dengan cara menekan tombol F5 dan tunggu sampai program selesai melakukan *running*. Pastikan hasil struktur yang telah didesain "aman". Berikutnya kita akan melakukan cek terhadap gaya geser dasar statik dan dinamik

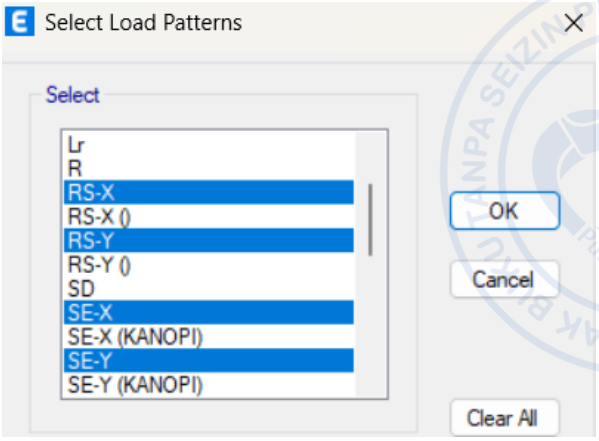
yang telah kita desain. Caranya adalah klik CTRL + T → *Analysis Results* → *Structure Output* → Base Reactions → *Table: Base Reactions*. Di bawah ini adalah gambar tabel yang akan ditampilkan.



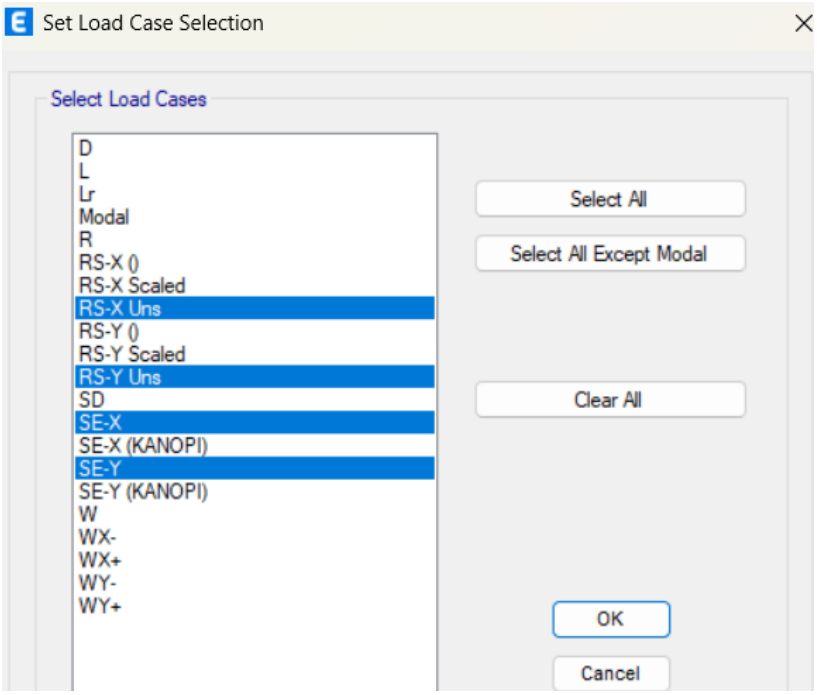
Gambar 4.25 *Hasil Concrete Frame Design*



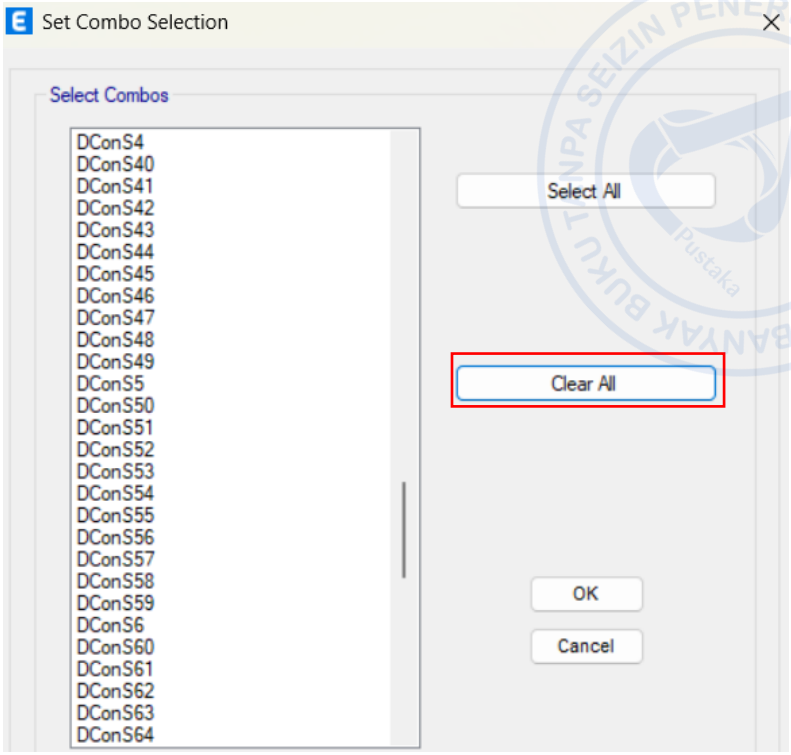
Gambar 4.26 *Choose Table for Display*



Gambar 4.27 *Select Load Patterns*



Gambar 4.28 *Set Load Cases Selection*



Gambar 4.29 *Set Combo Selection*

Tabel 4.21
Gaya Geser Dasar/*Base Reactions* yang Belum Diskalakan

Base Reactions

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None
Filter: None

Output Case	Case Type	Step Type	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m	X m	Y m	Z m
SE-X	LinStatic		-19989.2432	9.139E-07	-2.244E-06	-0.0001	-1657478	399577.3754	0	0	0
SE-Y	LinStatic		-1.08E-06	-21834.5261	1.349E-06	1810485.7571	-0.0001	-436548.3073	0	0	0
RS-X Uns	LinRespSpec	Max	11496.1549	1091.4006	7.517E-07	35330.459	572348.2577	238787.105	0	0	0
RS-Y Uns	LinRespSpec	Max	1091.4005	12331.8565	0	623505.6603	36769.4938	236068.419	0	0	0

Bisa dilihat pada tabel di atas bahwa hasil gaya geser statiknya (SE) lebih besar dari pada gaya geser dinamik yang belum diskalakan (RS Uns), baik arah X maupun arah X.

- SE – X = -19989.2432 kN
- SE – Y = -21834.5261 kN
- RS – X Uns = 11496.1549 kN
- RS – Y Uns = 12331.8565 kN

Berdasarkan tabel di atas, itu sudah memenuhi syarat untuk melakukan penskalaan untuk faktor skala yang baru sesuai dengan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.5.2.

7.9.2.5.2 Penentuan faktor skala untuk gaya geser dasar

Gaya geser dasar, V_X dan V_Y harus dihitung untuk arah x dan arah y sesuai 0.Untuk tiap gerak tanah yang dianalisis, faktor skala gaya geser dasar untuk tiap arah respons harus ditentukan sebagai berikut:

$$\eta_X = \frac{V_X}{V_{IX}} \geq 1{,}0 \qquad (49)$$

$$\eta_Y = \frac{V_Y}{V_{IY}} \geq 1{,}0 \qquad (50)$$

Gambar 4.30 Penentuan Faktor Skala Untuk Gaya Geser Dasar

Penskalaan gaya menurut SNI 1726:2019 dilakukan untuk memastikan hasil analisis dinamis (seperti metode respons spektrum) sesuai dengan gaya geser dasar minimum yang ditentukan oleh metode statik ekivalen, sebagaimana diatur dalam Pasal 7.9.1.4.1. Prosedur ini diadopsi dari ASCE 7-16 untuk menjamin desain struktur aman terhadap beban seismik, terutama pada Kategori Desain Seismik (KDS) D, E, atau F, di mana analisis dinamis sering kali diwajibkan.

7.9.1.4.1 Penskalaan gaya

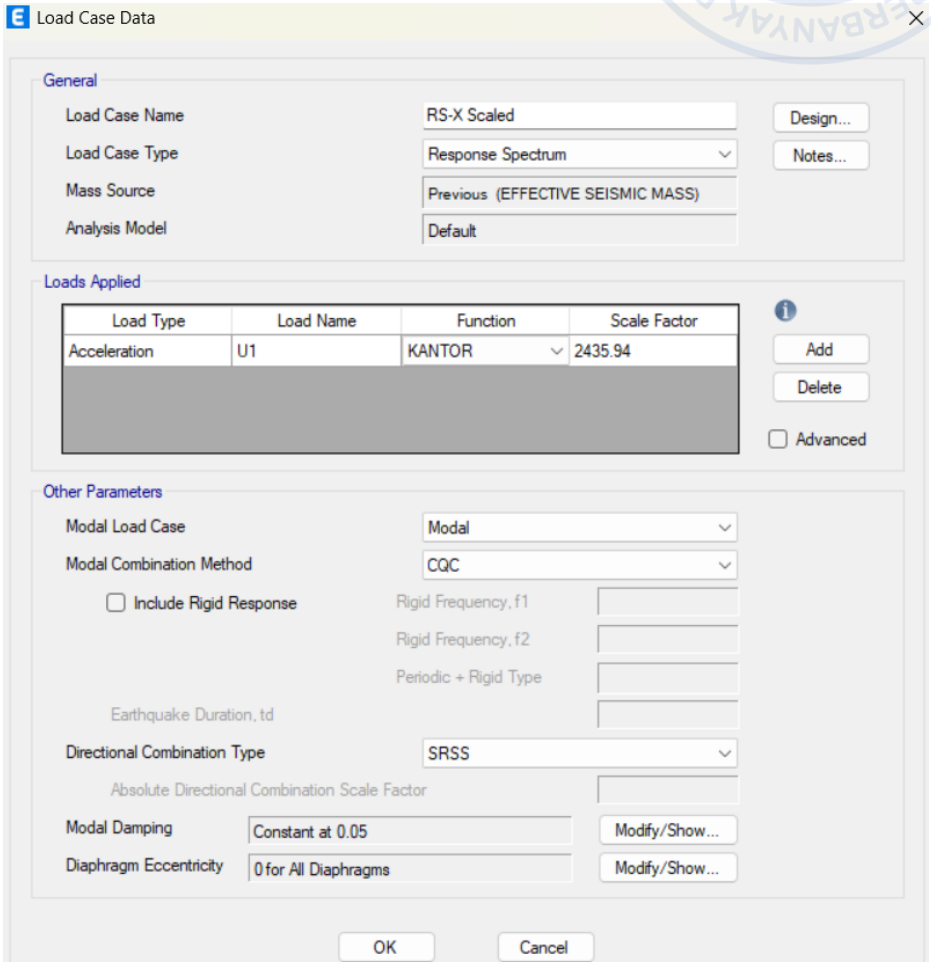
Apabila periode fundamental hasil analisis lebih besar dari $C_u T_a$ pada suatu arah tertentu, maka periode struktur T harus diambil sebesar $C_u T_a$. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_t) kurang dari 100 % dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_t, dimana. V adalah gaya geser dasar statik ekivalen yang dihitung sesuai pasal ini dan 7.8, dan V_t adalah gaya geser dasar yang didapatkan dari hasil analisis kombinasi ragam.

Gambar 4.31 Penskalaan Gaya

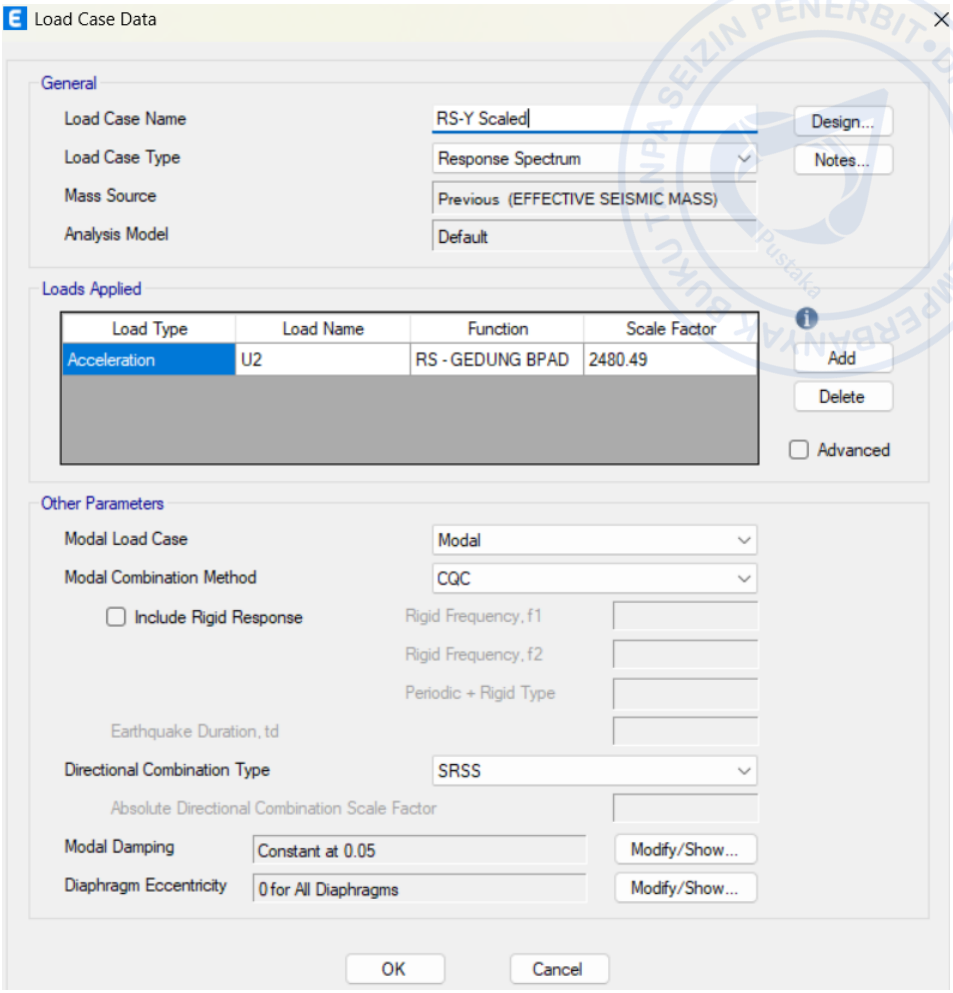
Tabel 4.22
Perhitungan Penskalaan Gaya

Penskalaan Gaya				
Gaya Geser Statik (Manual)	V	=	$C_s * W$	
SNI 1726:2019 persamaan 30	V_X	=	15003.08	kN
	V_Y	=	15003.08	kN
Gaya Geser Statik (ETABS)	V_X	=	19989.2432	kN
(hanya untuk pembanding)	V_Y	=	21834.5261	kN
Faktor Skala Awal	SF	=	$g / (R / I)$	
		=	9.80665/(7/1)	
SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.2		=	1.40095	m/s^2
		=	1400.95	mm/s^2
Gaya Geser Respon Spektra Unscaled (ETABS)	$V_{i,X}$	=	11496.1549	kN
	$V_{i,Y}$	=	12331.8565	kN
Penskalaan Gaya Gempa	f_X	=	1.7388	
SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.4.1	f_Y	=	1.7706	
Faktor Skala Baru	SF_X	=	2435.9388	mm/s^2
	SF_Y	=	2480.4926	mm/s^2

Bisa dilihat bahwa faktor skala yang baru adalah 2435.94 mm/s2 untuk arah X dan 1704.41 mm/s2 untuk arah Y. Dan nilai itu kita masukkan lagi ke dalam *load cases response spectrum* yang sudah diskalakan *(scaled*). Caranya sama seperti membuat *load cases*, yaitu klik *Define → Load Cases → Add New Case*, namun berikan namanya *RS - X Scaled* dan *RS - Y Scaled*. Di bawah ini adalah gambar dari pembuatan *RS - X Scaled* dan *RS - Y Scaled.*



Gambar 4.32 *Load Cases Data for RS -X Scaled*



Gambar 4.33 *Load Cases Data for RS -Y Scaled*

Setelah melakukan penginputan faktor skala yang baru, kita harus melakukan *running* ulang pada model yang telah dibuat. Setelah itu, kembali buka tabel gaya geser dasar untuk statik dan dinamik, namun kali ini untuk gaya gempa dinamik yang telah diskalakan. Di bawah ini adalah tabel *base reaction* untuk gaya geser statik dan dinamik yang telah diskalakan.

Tabel 4.23
Gaya Geser Dasar/*Base Reactions* yang Telah Diskalakan

Base Reactions

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None Base Reactions
Filter: None

Output Case	Case Type	Step Type	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m	X m
SE-X	LinStatic		-19989.2432	9.145E-07	-2.288E-06	-0.0001	-1657478	399577.3754	0
SE-Y	LinStatic		-1.073E-06	-21834.5261	1.396E-06	1810485.7571	-0.0001	-436548.3073	0
RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	19989.2527	1897.7025	1.333E-06	61431.7987	995186.1344	415197.5877	0
RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	1932.4107	21834.5258	7.727E-07	1103966.0063	65103.2922	417977.7768	0

Bisa dilihat pada tabel di atas bahwa hasil gaya geser statiknya (SE) lebih besar dari pada gaya geser dinamik yang belum diskalakan (RS Uns), baik arah X maupun arah X.

- SE – X = -19989.2432 kN
- SE – Y = -21834.5261 kN
- RS – X *Scaled* = 19989.2527 kN
- RS – Y *Scaled* = 21834.6258 kN

Berdasarkan tabel di atas, itu sudah memenuhi syarat untuk melakukan penskalaan untuk faktor skala yang baru sesuai dengan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.5.2.

5. Torsi Bawaan dan Torsi Tak Terduga

Torsi bawaan, sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019, merujuk pada momen puntir yang timbul pada struktur bangunan akibat ketidaksesuaian antara pusat massa dan pusat kekakuan pada setiap tingkat lantai. Fenomena ini terjadi ketika gaya gempa yang bekerja pada pusat massa menghasilkan efek puntiran karena adanya eksentrisitas, yaitu jarak antara pusat massa dan pusat kekakuan. Dalam desain seismik, torsi bawaan menjadi pertimbangan penting untuk memastikan bahwa elemen struktur, terutama pada bangunan dengan konfigurasi denah tidak beraturan, dapat menahan tegangan tambahan akibat puntiran, sehingga mencegah kerusakan lokal pada komponen seperti kolom atau dinding geser.

Dalam prosedur analisis gaya lateral ekivalen, torsi bawaan dihitung dengan mengalikan gaya lateral pada setiap tingkat lantai dengan eksentrisitas desain, menghasilkan momen puntir yang harus didistribusikan ke elemen penahan gempa seperti dinding geser atau rangka. SNI 1726:2019 menekankan bahwa distribusi torsi ini harus mempertimbangkan kekakuan relatif dari elemen struktur agar gaya puntir terbagi secara proporsional. Untuk bangunan dengan ketidakaturan puntir ekstrem, standar ini merekomendasikan analisis dinamik tambahan untuk memastikan bahwa efek torsi bawaan tidak menyebabkan deformasi berlebihan atau kegagalan struktur.

Untuk diafragma yang tidak fleksibel, distribusi gaya lateral di masing-masing tingkat harus memperhitungkan pengaruh momen torsi bawaan, Mt, akibat eksentrisitas antara lokasi pusat massa dan pusat kekakuan. Untuk diafragma fleksibel, distribusi gaya ke elemen vertikal harus memperhitungkan posisi dan distribusi massa yang didukungnya.

Torsi tak terduga sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019, merujuk pada momen puntir tambahan yang diperhitungkan dalam desain seismik untuk

mengakomodasi ketidakpastian atau ketidaksempurnaan dalam distribusi massa dan kekakuan struktur bangunan. Torsi ini timbul akibat eksentrisitas tak sengaja (*accidental eccentricity*), yang diasumsikan terjadi meskipun struktur dirancang dengan pusat massa dan pusat kekakuan yang sejajar. Ketentuan ini penting untuk memastikan bahwa bangunan tetap aman terhadap efek puntiran yang tidak terantisipasi selama gempa, terutama pada bangunan dengan denah tidak beraturan atau kompleks dan harus memenuhi SNI 1726:2019 Tabel 13.

Jika diafragma tidak fleksibel, desain harus menyertakan momen torsi bawaan (Mt) yang dihasilkan dari lokasi massa struktur ditambah momen torsi tak terduga (Mta) akibat perpindahan pusat massa dari lokasi aktualnya yang diasumsikan pada masing-masing arah dengan jarak sebesar 5% dimensi struktur tegak lurus terhadap arah gaya yang diterapkan.

Tabel 4.24
Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	**Ketidakberaturan torsi** didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan A_x = 1,0, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E, dan F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
1b.	**Ketidakberaturan torsi berlebihan** didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan A_x = 1,0, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	**Ketidakberaturan sudut dalam** didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15 % dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	**Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma** didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 % dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4.	**Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak turus terhadap bidang** didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	B, C, D,E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	**Ketidakberaturan sistem nonparalel** didefninisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

Jika gaya gempa diterapkan secara serentak dalam dua arah ortogonal, perpindahan pusat massa 5% yang disyaratkan tidak perlu diterapkan dalam kedua

arah ortogonal pada saat bersamaan, tetapi harus diterapkan dalam arah yang menghasilkan pengaruh yang lebih besar.

Torsi tak terduga harus diaplikasikan ke semua struktur untuk menentukan keberadaan ketidakberaturan horizontal seperti yang diatur pada Tabel 13. Momen torsi tak terduga (Mta) tidak perlu diperhitungkan pada saat menentukan gaya seismik E pada perencanaan struktur dan pada saat menentukan simpangan antar tingkat desain seperti pada pasal 7.8.6, 7.9.1.2 atau pasal 11.1.2, atau pada saat menentukan batasan-batasan pada pasal 7.12.1, kecuali untuk struktur-struktur berikut:

a. Struktur dengan kategori desain seismik B dengan ketidakberaturan struktur horizontal tipe 1b; dan
b. Struktur dengan kategori desain seismik C, D, E dan F dengan ketidakberaturan struktur horizontal tipe 1a atau 1b.

Pembesaran momen torsi tak terduga pada struktur yang didesain untuk kategori desain seismik C, D, E, atau F, di mana ketidakberaturan torsi tipe 1a atau 1b terjadi seperti didefinisikan dalam Tabel 13 harus mempunyai pengaruh yang diperhitungkan dengan mengalikan Mta di masing-masing tingkat dengan faktor pembesaran torsi (Ax) seperti digambarkan dalam Gambar 9 dan ditentukan dari persamaan berikut.

$$Ax = (\delta max/1{,}2\ \delta avg)^2$$

Keterangan:

δ max	= perpindahan maksimum di tingkat x (mm)
δ avg	= rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat x
Ax	= Faktor pembesaran torsi diasumsikan nilainya 1 mm

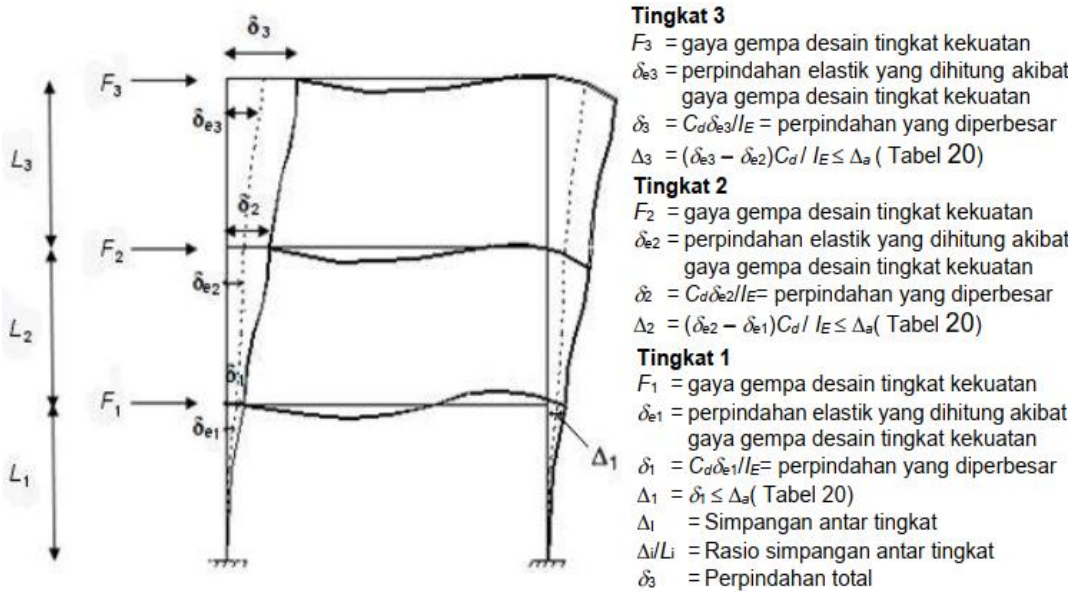
Faktor pembesaran torsi (Ax) tidak boleh kurang dari 1 dan tidak perlu melebihi 3. Pembebanan yang lebih parah untuk masing-masing elemen harus ditinjau untuk desain.

6. Pengecekan Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat, sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019, merujuk pada perbedaan perpindahan lateral relatif antara dua tingkat lantai berurutan pada struktur bangunan akibat beban gempa. Parameter ini penting untuk mengevaluasi kinerja seismik bangunan, karena simpangan antar tingkat yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada elemen struktur, seperti kolom atau dinding, serta elemen nonstruktural, seperti partisi atau fasad. Dalam SNI 1726:2019, khususnya pada Tabel 20, simpangan antar tingkat dihitung untuk memastikan bahwa deformasi struktur tetap dalam batas aman, sehingga mencegah keruntuhan atau kerusakan signifikan selama gempa.

Menurut SNI 1726:2019, simpangan antar tingkat dihitung berdasarkan hasil analisis struktur, baik menggunakan metode gaya lateral ekivalen, analisis spektrum respons ragam, maupun analisis riwayat waktu. Simpangan ini diukur sebagai selisih perpindahan lateral (δ) antara dua tingkat lantai berurutan, dibagi dengan tinggi lantai (h), dan dinyatakan sebagai rasio simpangan antar tingkat (*drift ratio*).

Penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Apabila pusat massa tidak segaris dalam arah vertikal, diizinkan untuk menghitung simpangan di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya. Jika desain tegangan izin digunakan, Δ harus dihitung menggunakan gaya seismik desain yang ditetapkan dalam Pasal 7.8.1 SNI 1726:2019 tanpa reduksi untuk desain tegangan izin.



Gambar 4.34 Penentuan Simpangan Antar Tingkat

Bagi struktur yang didesain untuk kategori desain seismik C, D, E atau F yang memiliki ketidakberaturan horizontal Tipe 1a atau 1b pada Tabel 13, simpangan antar tingkat desain, Δ, harus dihitung sebagai selisih terbesar dari simpangan titik-titik yang segaris secara vertikal di sepanjang salah satu bagian tepi struktur, di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau.

Simpangan pusat massa di tingkat-x (δx) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta = (C_d * \delta_{xe})/I_e$$

Keterangan:

C_d = faktor pembesaran simpangan lateral dalam Tabel 12

δ_{xe} = simpangan di tingkat x yang diisyaratkan pada pasal 7.8.6, dengan analisis elastik

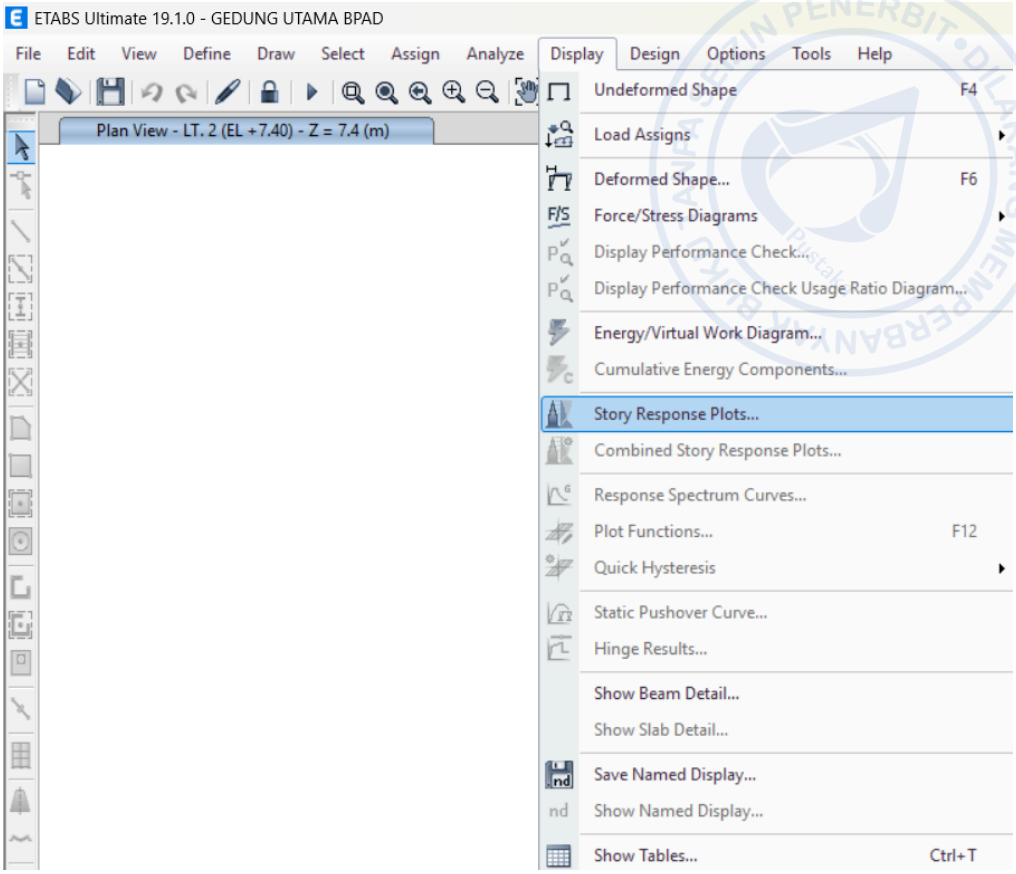
I_e = faktor keutamaan gempa

Tabel 4.25
Simpangan Antar Tingkat Izin

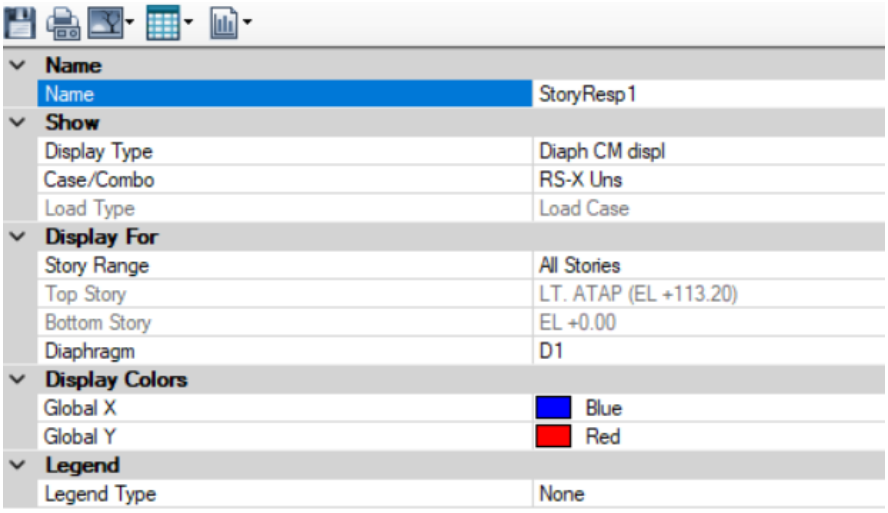
Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0{,}025h_{sx}$ [c]	$0{,}020h_{sx}$	$0{,}015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata[d]	$0{,}010h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0{,}007h_{sx}$	$0{,}007h_{sx}$	$0{,}007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0{,}020h_{sx}$	$0{,}015h_{sx}$	$0{,}010h_{sx}$

(Sumber: Tabel 20 SNI 1726:2019)

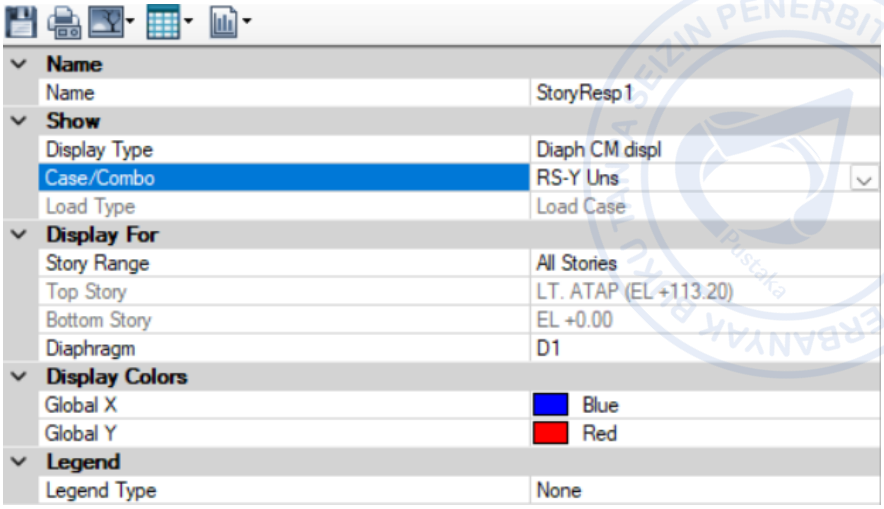
Setelah kita mengetahui syarat-syarat untuk simpangan antar tingkat, maka selanjutnya adalah mendapatkan nilai simpangan antar tingkat pada *software* ETABS. Caranya adalah klik *Display* → *Story Response Plots*.



Gambar 4.35 *Display Story Response Plots*

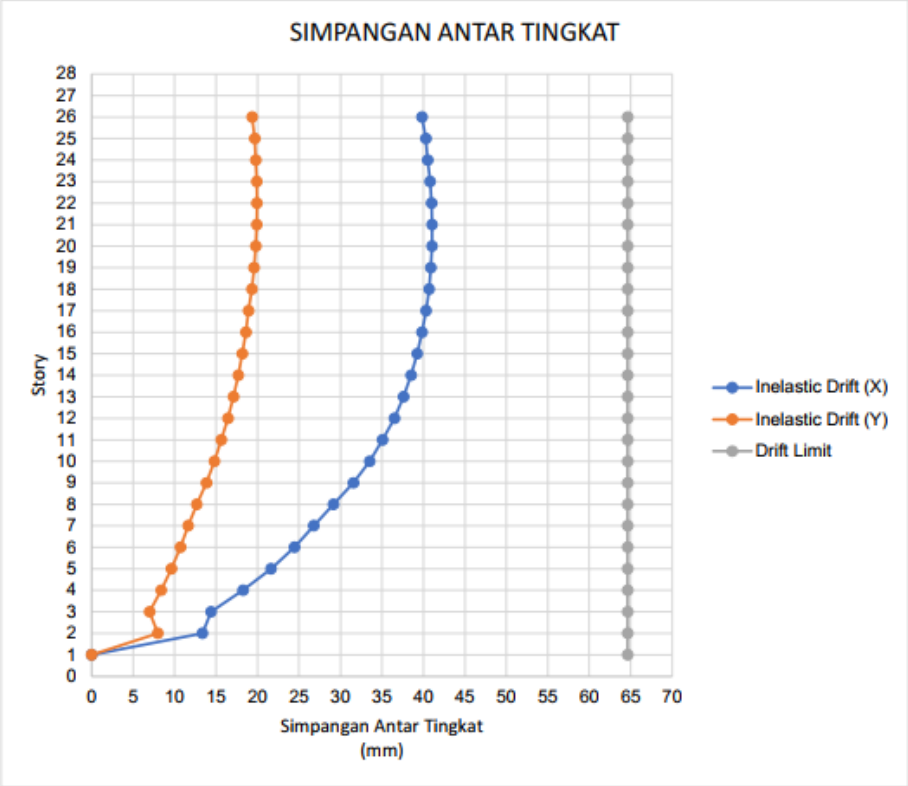


Gambar 4.36 *RS – X Unscale Diaphragma Center of Mass Displacement*



Name	
Name	StoryResp1
Show	
Display Type	Diaph CM displ
Case/Combo	RS-Y Uns
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	LT. ATAP (EL +113.20)
Bottom Story	EL +0.00
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None

Gambar 4.37 *RS – Y Unscale Diaphragma Center of Mass Displacement*



Gambar. Simpangan Antar Tingkat

Grafik 4.1 Hasil Pengecekan Simpangan Antar Tingkat

Tabel 4.26
Simpangan Antar Tingkat

Story	Displacement		Elastic Drift		h	Inelastic Drift		Drift Limit	Cek
	δe_X	δe_Y	δe_X	δe_Y		Δ_X	Δ_Y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
Dak	91.644	84.025	4.876	4.523	4200	26.818	24.8765	64.615	OK
26	86.768	79.502	4.11	3.78	4200	22.605	20.79	64.615	OK
25	82.658	75.722	4.132	3.8	4200	22.726	20.9	64.615	OK
24	78.526	71.922	4.147	3.809	4200	22.8085	20.9495	64.615	OK
23	74.379	68.113	4.164	3.818	4200	22.902	20.999	64.615	OK
22	70.215	64.295	4.174	3.821	4200	22.957	21.0155	64.615	OK
21	66.041	60.474	4.177	3.818	4200	22.9735	20.999	64.615	OK
20	61.864	56.656	4.174	3.808	4200	22.957	20.944	64.615	OK
19	57.69	52.848	4.162	3.79	4200	22.891	20.845	64.615	OK
18	53.528	49.058	4.14	3.763	4200	22.77	20.6965	64.615	OK
17	49.388	45.295	4.111	3.73	4200	22.6105	20.515	64.615	OK
16	45.277	41.565	4.072	3.687	4200	22.396	20.2785	64.615	OK
15	41.205	37.878	4.023	3.634	4200	22.127	19.987	64.615	OK
14	37.182	34.244	3.96	3.573	4200	21.780	19.652	64.615	OK
13	33.222	30.671	3.882	3.497	4200	21.351	19.234	64.615	OK
12	29.34	27.174	3.787	3.41	4200	20.829	18.755	64.615	OK
11	25.553	23.764	3.669	3.304	4200	20.180	18.172	64.615	OK
10	21.884	20.46	3.523	3.179	4200	19.377	17.485	64.615	OK
9	18.361	17.281	3.345	3.029	4200	18.398	16.660	64.615	OK
8	15.016	14.252	3.133	2.847	4200	17.232	15.659	64.615	OK
7	11.883	11.405	2.887	2.64	4200	15.879	14.520	64.615	OK
6	8.996	8.765	2.592	2.394	4200	14.256	13.167	64.615	OK
5	6.404	6.371	2.237	2.103	4200	12.304	11.567	64.615	OK
4	4.167	4.268	1.818	1.765	4200	9.999	9.708	64.615	OK
3	2.349	2.503	1.327	1.366	4200	7.299	7.513	64.615	OK
2	1.022	1.137	1.022	1.137	4200	5.621	6.254	64.615	OK
1									

7. Pengecekan Pengaruh P-Delta

Dalam SNI 1726:2019, P-Delta, merujuk pada efek orde kedua dalam analisis struktur bangunan akibat interaksi antara beban gravitasi (P) dan simpangan lateral (Δ) yang diinduksi oleh gaya gempa. Efek ini menyebabkan momen tambahan pada elemen struktur karena beban vertikal bertindak pada posisi yang telah bergeser secara lateral, sehingga memperburuk deformasi dan meningkatkan gaya internal seperti momen dan geser. Dalam desain seismik, pengaruh P-Delta harus diperhitungkan untuk memastikan stabilitas struktur, terutama pada bangunan tinggi atau fleksibel di wilayah rawan gempa seperti Indonesia, karena dapat menyebabkan ketidakstabilan jika tidak diatasi dengan benar.

Ketentuan ini diterapkan pada semua analisis struktur, baik metode gaya lateral ekivalen maupun analisis dinamik, dan wajib untuk bangunan dengan periode fundamental lebih dari 1,2 detik atau dengan rasio kekakuan yang rendah. SNI 1726:2019 menekankan bahwa pengaruh P-Delta juga memengaruhi simpangan antar tingkat, sehingga simpangan desain harus disesuaikan jika efek ini signifikan. Untuk bangunan dengan ketidakaturan vertikal, evaluasi P-Delta menjadi lebih kritis untuk mencegah konsentrasi deformasi pada tingkat tertentu, dan analisis nonlinier mungkin diperlukan jika θ mendekati 0,25, di mana struktur dianggap tidak stabil.

Penerapan pengaruh P-Delta dalam SNI 1726:2019 bertujuan untuk meningkatkan ketahanan seismik bangunan dengan mempertimbangkan efek realistis selama gempa. Dengan memperhitungkan interaksi ini, insinyur dapat merancang struktur yang lebih kaku, seperti menambahkan dinding geser atau memperbesar dimensi elemen, untuk mengurangi simpangan lateral dan mencegah keruntuhan progresif. Ketentuan ini selaras dengan standar internasional seperti ASCE 7-16, dan sangat relevan di Indonesia untuk meminimalkan kerusakan akibat gempa besar. Oleh karena itu, pemahaman pengaruh P-Delta menjadi elemen esensial dalam desain struktur yang aman dan tahan lama.

$$\Theta = (Px*\Delta*I_e)/(Vx*h_{sx}*C_d)$$

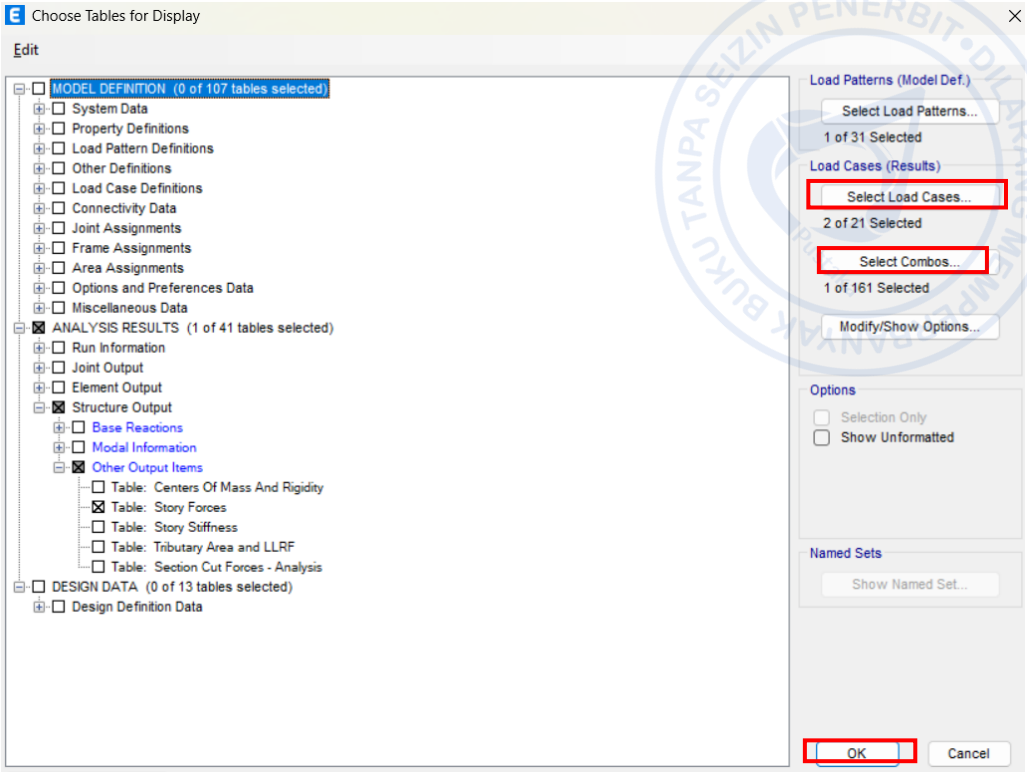
Keterangan:

P_x = beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x, (kN); bila menghitung P_x, faktor beban individu tidak perlu melebihi 1,0;
Δ = simpangan antar tingkat desain seperti didefinisikan dalam 0, terjadi secara serentak dengan V_x (mm)
I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 4.1.2
V_x = gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan $x - 1$ (kN)
h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x, (mm);
C_d = faktor pembesaran defleksi dalam Tabel 12.

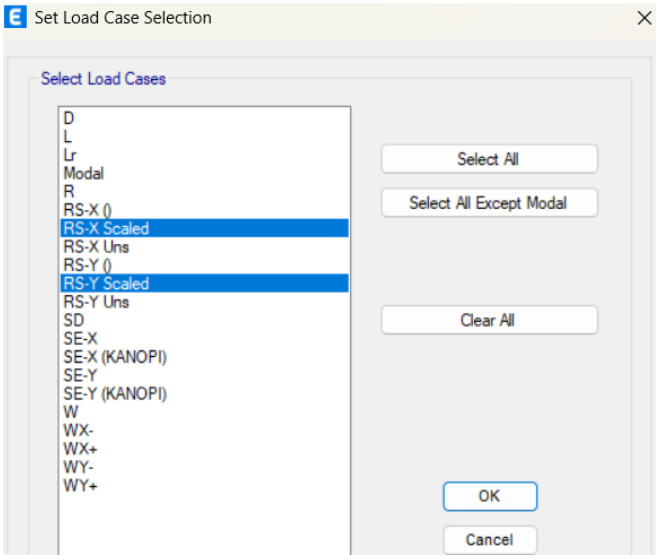
Koefisien stabilitas (θ) tidak boleh melebihi θ_{max} yang ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25$$

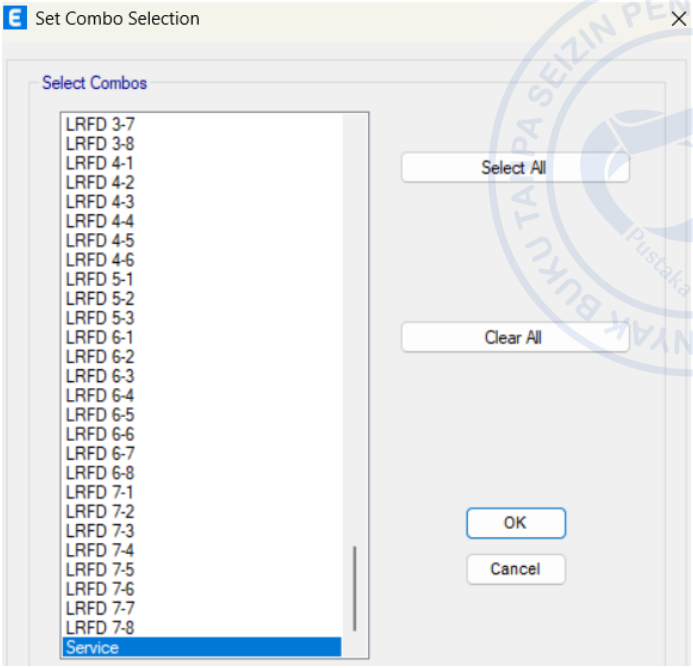
Untuk mengetahui nilai P-Delta berdasarkan *software* ETABS, terlebih dahulu melakukan *running* terhadap model struktur gedung yang telah kita buat. Setelah dilakukan *running*, klik Ctrl + T → Analysis Results → *Structure Output* → *Other Output Items* → *Story Forces* seperti ditunjukkan gambar di bawah.



Gambar 4.38 *Choose Tables for Display*



Gambar 4.39 *Set Load Case Selection*



Gambar 4.40 *Set Combo Selection*

Tabel 4.27

Story Forces

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] IS NOT NULL)

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	1150.1457	111.1303	23964.1931	0	0
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	1150.1457	111.1303	23964.1931	555.6515	5750.7285
LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	109.6878	1163.3174	22460.753	1.013E-06	9.317E-07
LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	109.6878	1163.3174	22460.753	5816.5872	548.4389
LT. ATAP (EL ...	Service	Combination		Top	1856.1535	0	0	0	37121.2666	-37122.8393
LT. ATAP (EL ...	Service	Combination		Bottom	8213.5045	0	0	0	164038.4357	-164252.5482
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	4261.1303	427.1006	89204.2343	555.6515	5750.7285
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	4261.1303	427.1006	89204.2343	2346.7875	23590.1524
LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	418.8993	4439.1337	85081.0404	5816.5872	548.4389
LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	418.8993	4439.1337	85081.0404	24431.7642	2302.9546
LT. 26 (EL +10...	Service	Combination		Top	26940.5667	0	0	6.509E-06	539617.085	-536510.0005
LT. 26 (EL +10...	Service	Combination		Bottom	35064.3867	0	0	6.506E-06	701900.4106	-698971.8596
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	6347.0477	648.3713	133085.9423	2346.7875	23590.1524
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	6347.0477	648.3713	133085.9423	5062.338	50113.8174
LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	636.1633	6693.928	128052.5797	24431.7642	2302.9546
LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	636.1633	6693.928	128052.5797	52455.0957	4965.9842
LT. 25 (EL 104...	Service	Combination		Top	50205.1062	0	0	1.203E-05	1004752.0799	-1001833
LT. 25 (EL 104...	Service	Combination		Bottom	58328.9262	0	0	1.202E-05	1167035.4055	-1164295
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	7839.6579	813.2427	164597.4633	5062.338	50113.8174
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	7839.6579	813.2427	164597.4633	8461.1823	82701.5653
LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	797.8415	8350.036	159451.1593	52455.0957	4965.9842
LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	797.8415	8350.036	159451.1593	87264.5224	8300.1284
LT. 24 (EL +99...	Service	Combination		Top	73469.6457	0	0	1.735E-05	1469887.0748	-1467156
LT. 24 (EL +99...	Service	Combination		Bottom	81593.4658	0	0	1.734E-05	1632170.4004	-1629618
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	8858.0723	924.8389	186068.7642	8461.1823	82701.5653
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	8858.0723	924.8389	186068.7642	12317.9851	119200.3013
LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	906.338	9509.6499	181447.8896	87264.5224	8300.1284
LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Bottom	0	906.338	9509.6499	181447.8896	126627.9394	12080.1976
LT. 23 (EL +95...	Service	Combination		Top	96734.1853	0	0	2.27E-05	1935022.0697	-1932479

Setelah muncul tabel *story forces*, langkah selanjutnya adalah dengan klik kanan pada kolom *Output Case* → *Service* dan *Location* → *Top*. Kemudian salin beban P dari lantai 26 sampai lantai 2 ke dalam *sheet* Excel yang sudah dibuat berdasarkan rumus SNI di atas untuk menghitung P-Delta.

Tabel 4.28
Output Case Service

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None
Filter: ([Output Case] = 'Service') AND ([Location] = 'Top')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	Service	Combination		Top	1856.1535	0	0	0	37121.2666	-37122.8393
LT. 26 (EL +10...	Service	Combination		Top	26940.5667	0	0	6.509E-06	539617.085	-536510.0005
LT. 25 (EL 104...	Service	Combination		Top	50205.1062	0	0	1.203E-05	1004752.0799	-1001833
LT. 24 (EL +99...	Service	Combination		Top	73469.6457	0	0	1.735E-05	1469887.0748	-1467156
LT. 23 (EL +95...	Service	Combination		Top	96734.1853	0	0	2.27E-05	1935022.0697	-1932479
LT. 22 (EL +91...	Service	Combination		Top	119998.7248	0	0	2.822E-05	2400157.0646	-2397802
LT. 21 (EL +87...	Service	Combination		Top	143263.2643	0	0	3.256E-05	2865292.0595	-2863125
LT. 20 (EL +83...	Service	Combination		Top	166527.8039	0	0	3.598E-05	3330427.0544	-3328448
LT. 19 (EL +78...	Service	Combination		Top	189792.3434	0	0	3.912E-05	3795562.0493	-3793771
LT. 18 (EL +74...	Service	Combination		Top	213056.8829	0	-5.615E-07	4.246E-05	4260697.0442	-4259093
LT. 17 (EL +70...	Service	Combination		Top	236321.4225	0	-6.254E-07	4.55E-05	4725832.0391	-4724416
LT. 16 (EL 66....	Service	Combination		Top	259585.962	0	-7.002E-07	4.807E-05	5190967.0341	-5189739
LT. 15 (EL +62...	Service	Combination		Top	283713.8615	0	-7.611E-07	4.985E-05	5673369.229	-5672329
LT. 14 (EL +57...	Service	Combination		Top	306978.4011	0	-8.183E-07	0.0001	6138504.2239	-6137652
LT. 13 (EL +53...	Service	Combination		Top	330370.5994	0	-8.624E-07	0.0001	6606192.3941	-6605528
LT. 12 (EL 49....	Service	Combination		Top	353741.7097	0	-9.031E-07	0.0001	7073458.8057	-7072983
LT. 11 (EL +45...	Service	Combination		Top	377112.8201	0	-9.554E-07	4.947E-05	7540725.2172	-7540437
LT. 10 (EL +41...	Service	Combination		Top	400483.9305	0	-9.984E-07	4.875E-05	8007991.6287	-8007892
LT. 9 (EL +36....	Service	Combination		Top	423855.0408	0	-1.031E-06	4.831E-05	8475258.0403	-8475346
LT. 8 (EL 32.60)	Service	Combination		Top	447186.6108	0	-1.057E-06	4.841E-05	8941733.6435	-8942009
LT. 7 (EL 28.40)	Service	Combination		Top	471233.2974	0	-1.082E-06	4.773E-05	9422511.5796	-9422975
LT. 6 (EL +24....	Service	Combination		Top	495279.9839	0	-1.102E-06	4.724E-05	9903289.5156	-9903941
LT. 5 (EL +20....	Service	Combination		Top	519326.6705	0	-1.123E-06	4.738E-05	10384067	-10384907
LT. 4 (EL +15....	Service	Combination		Top	542828.3891	0	-1620.6984	-32413.968	10832489	-10859116
LT. 3 (EL +11....	Service	Combination		Top	566242.6422	-5.3798	-3783.0774	-75450.5104	11292975	-11334096
LT. 2 (EL +7.40)	Service	Combination		Top	589956.9249	-5.3798	-3783.0774	-75450.5104	11776442	-11815107

Tabel 4.29
Input Nilai P

Story	Inelastic Drift		Story Forces			h	Koefisien Stabilitas		Batas Pengaruh P-Delta	Batas Stabiltas Struktur, θ_{max}	Cek
	Δ_X	Δ_Y	P	V_x	V_y						
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)	θX	θY			
						4200					
26	22.605	20.790	26940.567								
25	22.726	20.900	50205.106								
24	22.809	20.950	73469.646								
23	22.902	20.999	96734.185								
22	22.957	21.016	119998.725								
21	22.974	20.999	143263.264								
20	22.957	20.944	166527.804								
19	22.891	20.845	189792.343								
18	22.770	20.697	213056.883								
17	22.611	20.515	236321.423								
16	22.396	20.279	259585.962								
15	22.127	19.987	283713.862								
14	21.780	19.652	306978.401								
13	21.351	19.234	330370.599								
12	20.829	18.755	353741.710								
11	20.180	18.172	377112.820								
10	19.377	17.485	400483.931								
9	18.398	16.660	423855.041								
8	17.232	15.659	447186.611								
7	15.879	14.520	471233.297								
6	14.256	13.167	495279.984								
5	12.304	11.567	519326.671								
4	9.999	9.708	542828.389								
3	7.299	7.513	566242.642								
2	5.621	6.254	589956.925								
1											

Cara yang sama dilakukan untuk memasukkan nilai Vx dan Vy ke dalam *sheet* Excel yang telah dibuat. Akan tetapi, pada kolom *Output Case* diganti dengan *RS – X Scaled* dan *RS – Y Scaled.*

Tabel 4.30

Output Case RS – X Scaled

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-X Scaled') AND ([Location] = 'Top')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	1150.1457	111.1303	23964.1931	0	0
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	4261.1303	427.1006	89204.2343	555.6515	5750.7285
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	6347.0477	648.3713	133085.9423	2346.7875	23590.1524
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	7839.6579	813.2427	164597.4633	5062.338	50113.8174
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	8858.0723	924.8389	186068.7642	8461.1823	82701.5653
LT. 22 (EL +91...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	9511.0999	985.8941	199660.7994	12317.9851	119200.3013
LT. 21 (EL +87...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	9890.6175	1000.9527	207268.2768	16417.9505	157890.6048
LT. 20 (EL +83...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	10073.1087	976.8016	210533.4516	20560.4687	197425.7699
LT. 19 (EL +78...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	5.972E-07	10126.1574	922.1868	210943.5364	24565.6075	236767.7272
LT. 18 (EL +74...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	6.563E-07	10115.5466	847.5177	209951.2877	28279.6643	275136.977
LT. 17 (EL +70...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.073E-07	10108.7259	765.2133	209039.3113	31578.3278	311983.6015
LT. 16 (EL 66....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8E-07	10172.3041	690.8067	209670.4238	34367.7327	346977.5444
LT. 15 (EL +62...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.675E-07	10363.9994	643.4439	213118.7741	36584.5936	380010.7422
LT. 14 (EL +57...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.705E-07	10722.48	641.8124	220245.6923	38196.6822	411202.1905
LT. 13 (EL +53...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.009E-06	11262.7065	694.3473	231386.6189	39204.6497	440897.9008
LT. 12 (EL 49....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.063E-06	11973.9827	794.27	246307.8707	39643.5953	469648.9297
LT. 11 (EL +45...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.125E-06	12821.6641	926.014	264248.8306	39591.5647	498197.7546
LT. 10 (EL +41...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.21E-06	13762.1215	1074.6659	284249.6421	39181.1048	527443.3196
LT. 9 (EL +36....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.299E-06	14749.4135	1228.3421	305299.544	38604.9372	558355.1455
LT. 8 (EL 32.60)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.311E-06	15761.7656	1380.6901	326899.2501	38119.0564	591887.9218
LT. 7 (EL 28.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.348E-06	16763.254	1523.7836	348237.547	38023.6968	628875.9701
LT. 6 (EL +24....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.389E-06	17692.9507	1647.3726	367965.8917	38636.9709	670010.7694
LT. 5 (EL +20....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.408E-06	18513.5624	1746.9583	385209.1797	40225.9289	715774.2963
LT. 4 (EL +15....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.423E-06	19188.4459	1820.9207	398968.1856	42923.4392	766361.7112
LT. 3 (EL +11....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.439E-06	19648.9049	1866.8121	408317.7992	46705.3671	821676.1144
LT. 2 (EL +7.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.367E-06	19988.7882	1897.6913	415188.6354	51424.5102	881323.7762

Tabel 4.31

Output Case RS – Y Scaled

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

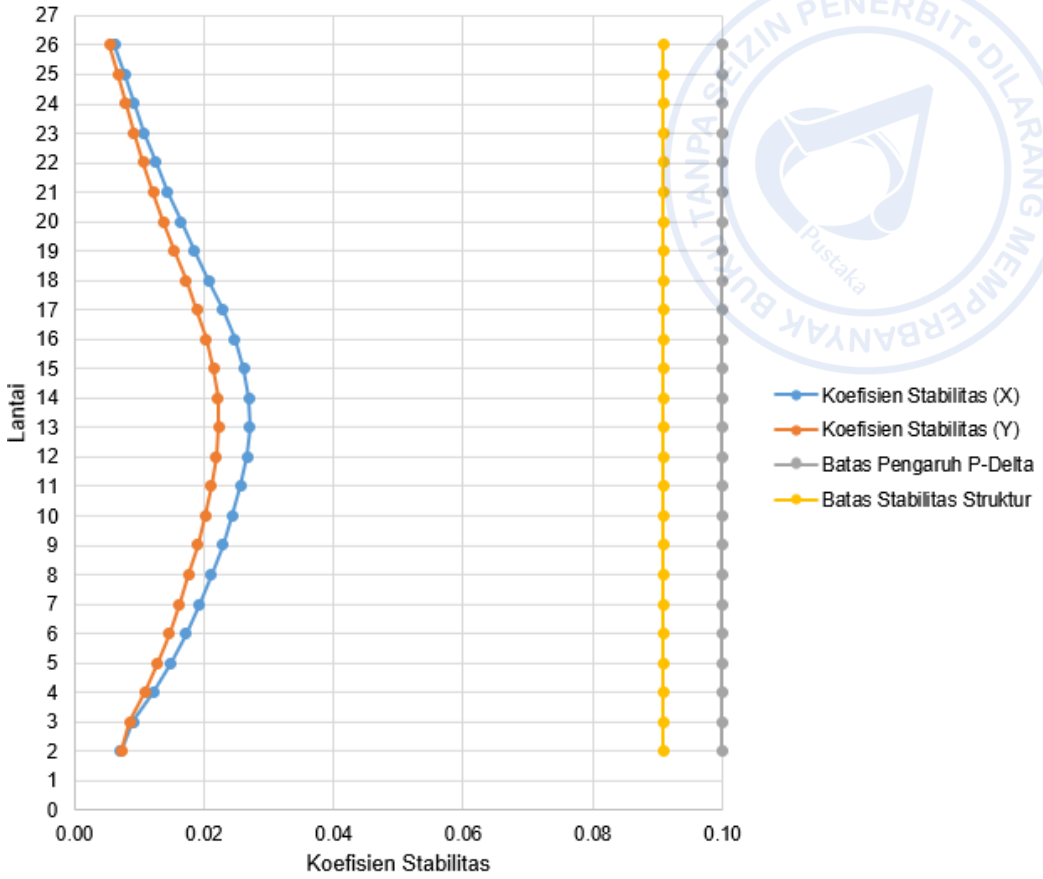
Filter: ([Output Case] = 'RS-Y Scaled') AND ([Location] = 'Top')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	109.6878	1163.3174	22460.753	1.013E-06	9.317E-07
LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	418.8993	4439.1337	85081.0404	5816.5872	548.4389
LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	636.1633	6693.928	128052.5797	24431.7642	2302.9546
LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	797.8415	8350.036	159451.1593	52455.0957	4965.9842
LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	906.338	9509.6499	181447.8896	87264.5224	8300.1284
LT. 22 (EL +91...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	964.2072	10274.4935	196127.7747	126627.9394	12080.1976
LT. 21 (EL +87...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	976.235	10737.2521	205299.841	168708.593	16090.3297
LT. 20 (EL +83...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	949.8816	10979.6063	210484.0472	212034.8151	20129.0308
LT. 19 (EL +78...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	894.8195	11075.5382	213012.5413	255455.0548	24016.954
LT. 18 (EL +74...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	822.5218	11096.1905	214151.7754	298097.0585	27603.1631
LT. 17 (EL +70...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	746.5445	11112.8194	215172.5494	339340.1587	30768.3674
LT. 16 (EL 66....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	683.3629	11195.2987	217326.3261	378802.2937	33425.6931
LT. 15 (EL +62...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	651.7842	11405.2857	221721.5727	416338.0989	35520.4941
LT. 14 (EL +57...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	667.3364	11786.2008	229144.8756	452041.2809	37030.7275
LT. 13 (EL +53...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	733.8677	12357.4909	239961.5112	486243.4513	37969.0019
LT. 12 (EL 49....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	5.401E-07	842.5154	13111.167	254047.3113	519491.33	38384.7801
LT. 11 (EL +45...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	6.107E-07	978.6206	14012.6044	270794.5887	552532.0748	38373.6297
LT. 10 (EL +41...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.207E-07	1128.8795	15016.4435	289398.5894	586276.5334	38088.9583
LT. 9 (EL +36....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.654E-07	1282.487	16074.2499	308995.9428	621711.2883	37746.167
LT. 8 (EL 32.60)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.67E-07	1433.5713	17163.597	329208.4033	659812.3938	37620.1427
LT. 7 (EL 28.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.235E-07	1574.4126	18247.0268	349385.9071	701439.6982	38016.3234
LT. 6 (EL +24....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.609E-07	1695.0921	19259.0466	368349.6871	747319.8463	39230.5068
LT. 5 (EL +20....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.514E-07	1791.3912	20160.305	385423.9275	797979.7703	41475.8744
LT. 4 (EL +15....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.641E-07	1861.8996	20912.4346	399988.9235	853662.1237	44819.5745
LT. 3 (EL +11....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.59E-07	1904.6608	21437.5057	410182.3122	914314.2032	49186.3132
LT. 2 (EL +7.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.659E-07	1932.3994	21834.1458	417969.7525	979570.831	54405.8723

Salin beban *RS – X Scaled* (VX) dan *RS – Y Scaled* (VY) dari lantai 26 sampai lantai 2 ke dalam *sheet* Excel yang sudah dibuat berdasarkan rumus SNI di atas untuk menghitung P-Delta.

Tabel 4.32
Hasil Perhitungan P-Delta

Story	Inelastic Drift		Story Forces			h	Koefisien Stabilitas		Batas Pengaruh P-Delta	Batas Stabiltas Struktur, θ_{max}	Cek
	Δ_X	Δ_Y	P	V_x	V_y						
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(mm)	θX	θY			
						4200					
26	22.605	20.790	26940.567	4261.130	4439.134	4200	0.0062	0.0055	0.1	0.0909	OK
25	22.726	20.900	50205.106	6347.048	6693.928	4200	0.0078	0.0068	0.1	0.0909	OK
24	22.809	20.950	73469.646	7839.658	8350.036	4200	0.0093	0.0080	0.1	0.0909	OK
23	22.902	20.999	96734.185	8858.072	9509.650	4200	0.0108	0.0092	0.1	0.0909	OK
22	22.957	21.016	119998.725	9511.100	10274.494	4200	0.0125	0.0106	0.1	0.0909	OK
21	22.974	20.999	143263.264	9890.618	10737.252	4200	0.0144	0.0121	0.1	0.0909	OK
20	22.957	20.944	166527.804	10073.109	10979.606	4200	0.0164	0.0138	0.1	0.0909	OK
19	22.891	20.845	189792.343	10126.157	11075.538	4200	0.0186	0.0155	0.1	0.0909	OK
18	22.770	20.697	213056.883	10115.547	11096.191	4200	0.0208	0.0172	0.1	0.0909	OK
17	22.611	20.515	236321.423	10108.726	11112.819	4200	0.0229	0.0189	0.1	0.0909	OK
16	22.396	20.279	259585.962	10172.304	11195.299	4200	0.0247	0.0204	0.1	0.0909	OK
15	22.127	19.987	283713.862	10363.999	11405.286	4200	0.0262	0.0215	0.1	0.0909	OK
14	21.780	19.652	306978.401	10722.480	11786.201	4200	0.0270	0.0222	0.1	0.0909	OK
13	21.351	19.234	330370.599	11262.707	12357.491	4200	0.0271	0.0223	0.1	0.0909	OK
12	20.829	18.755	353741.710	11973.983	13111.167	4200	0.0266	0.0219	0.1	0.0909	OK
11	20.180	18.172	377112.820	12821.664	14012.604	4200	0.0257	0.0212	0.1	0.0909	OK
10	19.377	17.485	400483.931	13762.122	15016.444	4200	0.0244	0.0202	0.1	0.0909	OK
9	18.398	16.660	423855.041	14749.414	16074.250	4200	0.0229	0.0190	0.1	0.0909	OK
8	17.232	15.659	447186.611	15761.766	17163.597	4200	0.0212	0.0177	0.1	0.0909	OK
7	15.879	14.520	471233.297	16763.254	18247.027	4200	0.0193	0.0162	0.1	0.0909	OK
6	14.256	13.167	495279.984	17692.951	19259.047	4200	0.0173	0.0147	0.1	0.0909	OK
5	12.304	11.567	519326.671	18513.562	20160.305	4200	0.0149	0.0129	0.1	0.0909	OK
4	9.999	9.708	542828.389	19188.446	20912.435	4200	0.0122	0.0109	0.1	0.0909	OK
3	7.299	7.513	566242.642	19648.905	21437.506	4200	0.0091	0.0086	0.1	0.0909	OK
2	5.621	6.254	589956.925	19988.788	21834.146	4200	0.0072	0.0073	0.1	0.0909	OK



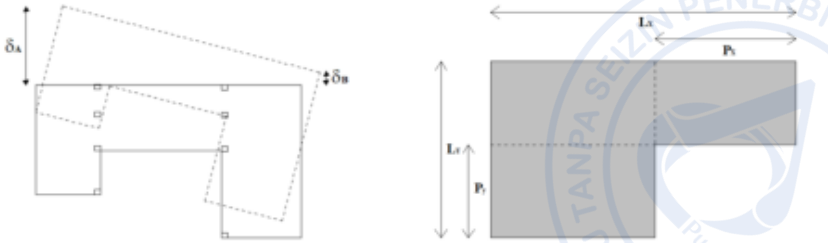
Grafik 4.2 Hasil Pengecekan Pengaruh P-Delta

8. Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan horizontal dalam konteks perencanaan ketahanan gempa mengacu pada kondisi struktur bangunan gedung atau nongedung yang menunjukkan ketidakmerataan distribusi massa, kekakuan, atau kekuatan secara horizontal, sehingga dapat menimbulkan respons seismik yang tidak seragam. Menurut Tabrl 13 SNI 1726:2019, ketidakberaturan ini diklasifikasikan untuk memastikan bahwa desain struktur memperhitungkan potensi peningkatan beban gempa akibat ketidakberaturan tersebut. Klasifikasi ini bertujuan untuk mencegah kerusakan berlebih pada elemen struktural selama kejadian gempa, dengan menekankan analisis yang lebih ketat pada struktur yang termasuk dalam kategori desain seismik tertentu. Ketidakberaturan horizontal sering kali terjadi pada bangunan dengan bentuk denah tidak simetris, seperti bentuk L, T, atau U, yang dapat menyebabkan torsi atau deformasi tidak merata.

Tabel 4.33
Ketidakberaturan Horizontal

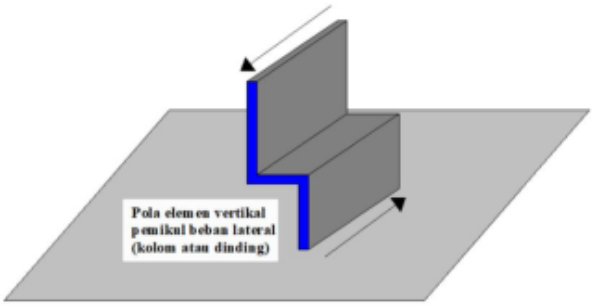
	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	**Ketidakberaturan torsi** didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan A_x = 1,0, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E, dan F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
1b.	**Ketidakberaturan torsi berlebihan** didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan A_x = 1,0, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	**Ketidakberaturan sudut dalam** didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15 % dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	**Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma** didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 % dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4.	**Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak turus terhadap bidang** didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	B, C, D,E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	**Ketidakberaturan sistem nonparalel** didefninisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F



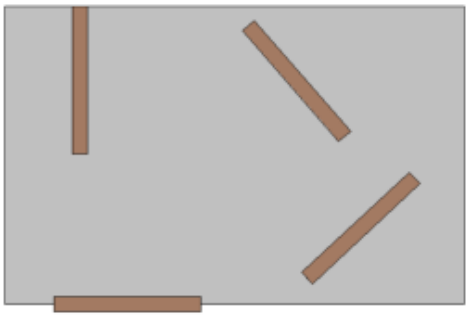
(a) Ketidakberaturan 1a dan 1b

(b) Ketidakberaturan 2

(c) Ketidakberaturan 3

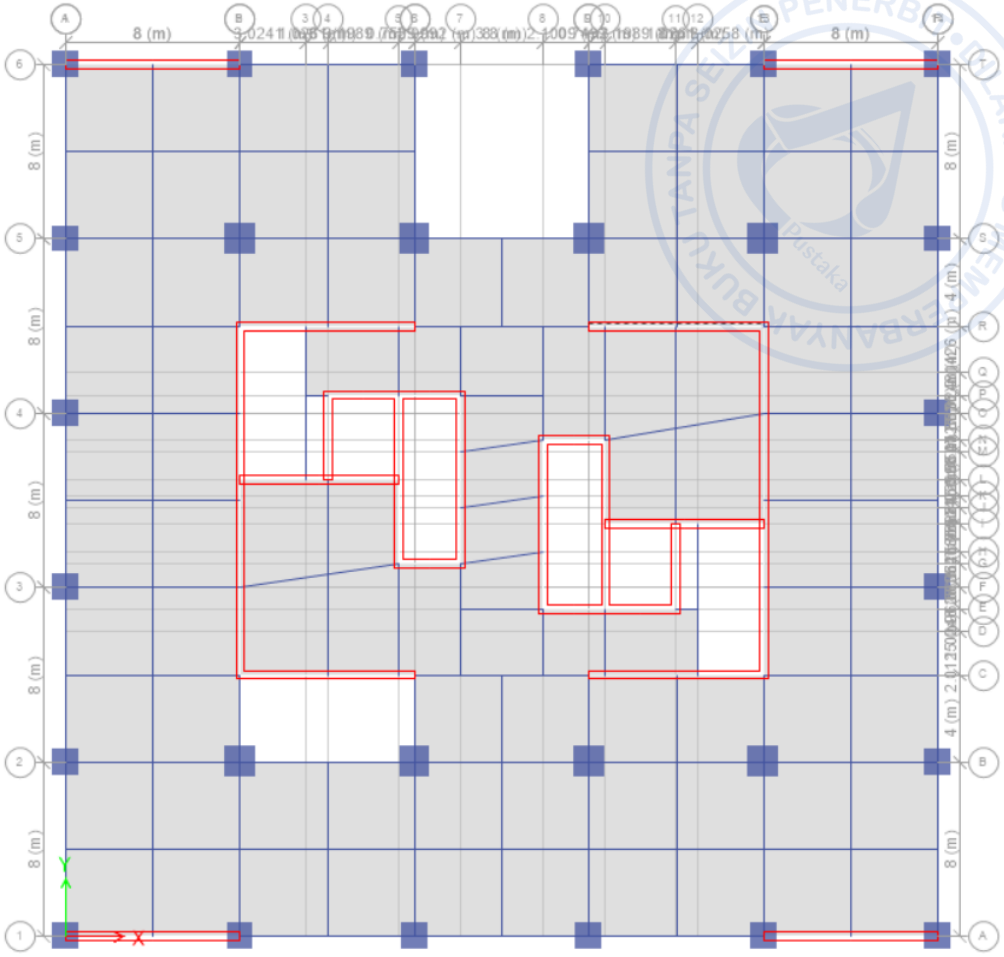


(d) Ketidakberaturan 4



(e) Ketidakberaturan 5

Gambar 4.41 Bentuk-Bentuk Ketidakberaturan Horizontal



Gambar 4.42 Denah Gedung Kantor 26 Lantai

a. Ketidakberaturan torsi

Untuk melakukan pengecekan ketidakberaturan torsi, terlebih dahulu kita harus mengetahui nilai rasio antar tingkatnya. Caranya adalah klik Ctrl + T → *Analysis Results* → *Joint Output* → *Displacement* → *Table: Story Max Over Avg Drift* → pilih *Load Pattern* RS – X, RS – Y, SE – X dan SE – Y → pilih *Load Cases RS – X Scaled, RS – Y Scaled,* SE – X dan SE – Y → OK. Lalu klik kanan pada kolom *Output Case* → *RS – X Scaled* dan juga *RS – Y Scaled.*

Tabel 4.34

Story Max Over Avg Drift on RS – X Scaled

Story Max Over Avg Drifts

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-X Scaled')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Direction	Max Drift mm	Avg Drift mm	Ratio
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	8.922	8.912	1.001
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.585	7.562	1.003
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.669	7.646	1.003
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.741	7.717	1.003
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.801	7.777	1.003
LT. 22 (EL +91...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.84	7.816	1.003
LT. 21 (EL +87...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.854	7.829	1.003
LT. 20 (EL +83...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.839	7.814	1.003
LT. 19 (EL +78...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.797	7.772	1.003
LT. 18 (EL +74...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.727	7.702	1.003
LT. 17 (EL +70...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.632	7.608	1.003
LT. 16 (EL 66....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.514	7.489	1.003
LT. 15 (EL +62...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.373	7.348	1.003
LT. 14 (EL +57...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.209	7.184	1.003
LT. 13 (EL +53...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	7.019	6.995	1.003
LT. 12 (EL 49....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	6.802	6.778	1.004
LT. 11 (EL +45...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	6.551	6.528	1.004
LT. 10 (EL +41...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	6.258	6.235	1.004
LT. 9 (EL +36....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	5.913	5.891	1.004
LT. 8 (EL 32.60)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	5.519	5.497	1.004
LT. 7 (EL 28.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	5.075	5.054	1.004
LT. 6 (EL +24....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	4.545	4.527	1.004
LT. 5 (EL +20....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	3.919	3.901	1.005
LT. 4 (EL +15....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	3.182	3.167	1.005
LT. 3 (EL +11....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	2.32	2.311	1.004
LT. 2 (EL +7.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	X	1.784	1.777	1.004

Tabel 4.35

Story Max Over Avg Drift on RS – Y Scaled

Story Max Over Avg Drifts

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-Y Scaled')

	Story	Output Case	Case Type	Step Type	Direction	Max Drift mm	Avg Drift mm	Ratio
▶	LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	8.354	8.347	1.001
	LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.028	7.017	1.001
	LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.106	7.096	1.001
	LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.159	7.149	1.001
	LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.205	7.194	1.002
	LT. 22 (EL +91...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.23	7.219	1.002
	LT. 21 (EL +87...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.233	7.222	1.002
	LT. 20 (EL +83...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.212	7.201	1.002
	LT. 19 (EL +78...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.165	7.154	1.002
	LT. 18 (EL +74...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.095	7.084	1.002
	LT. 17 (EL +70...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	7.003	6.992	1.002
	LT. 16 (EL 66....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.888	6.878	1.002
	LT. 15 (EL +62...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.754	6.743	1.002
	LT. 14 (EL +57...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.6	6.589	1.002
	LT. 13 (EL +53...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.422	6.411	1.002
	LT. 12 (EL 49....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.225	6.215	1.002
	LT. 11 (EL +45...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	6.001	5.991	1.002
	LT. 10 (EL +41...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	5.746	5.735	1.002
	LT. 9 (EL +36....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	5.452	5.442	1.002
	LT. 8 (EL 32.60)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	5.106	5.097	1.002
	LT. 7 (EL 28.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	4.722	4.713	1.002
	LT. 6 (EL +24....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	4.271	4.262	1.002
	LT. 5 (EL +20....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	3.746	3.738	1.002
	LT. 4 (EL +15....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	3.14	3.134	1.002
	LT. 3 (EL +11....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	2.427	2.423	1.002
	LT. 2 (EL +7.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Y	2.016	2.013	1.002

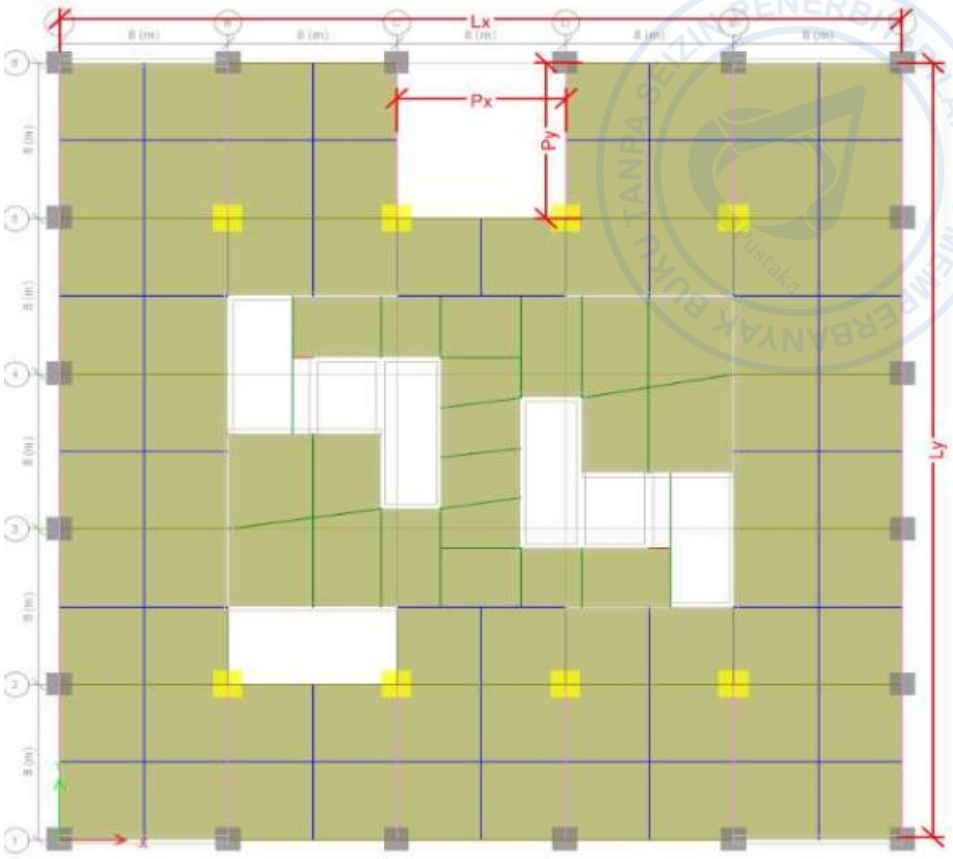
Tabel 4.36
Pengecekan Ketidakberaturan Torsi

Lantai	Arah X		Arah Y	
	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek	$\Delta_{max}/\Delta_{avg}$	Cek
Dak	1.001	OK	1.001	OK
26	1.003	OK	1.001	OK
25	1.003	OK	1.001	OK
24	1.003	OK	1.001	OK
23	1.003	OK	1.002	OK
22	1.003	OK	1.002	OK
21	1.003	OK	1.002	OK
20	1.003	OK	1.002	OK
19	1.003	OK	1.002	OK
18	1.003	OK	1.002	OK
17	1.003	OK	1.002	OK
16	1.003	OK	1.002	OK
15	1.003	OK	1.002	OK
14	1.003	OK	1.002	OK
13	1.003	OK	1.002	OK
12	1.004	OK	1.002	OK
11	1.004	OK	1.002	OK
10	1.004	OK	1.002	OK
9	1.004	OK	1.002	OK
8	1.004	OK	1.002	OK
7	1.004	OK	1.002	OK
6	1.004	OK	1.002	OK
5	1.005	OK	1.002	OK
4	1.005	OK	1.002	OK
3	1.004	OK	1.002	OK
2	1.004	OK	1.002	OK

Dapat disimpulkan dari hasil perhitungan pada tabel di atas, diketahui bahwa struktur gedung kantor ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN TORSI 1a DAN 1b**.

b. Ketidakberaturan sudut dalam

Untuk mengetahui apakah struktur yang kita desain memiliki ketidakberaturan sudut dalam atau tidak, maka kita harus menghitung secara manual menggunakan Excel dengan mengacu pada SNI 1726:2019 Tabel 13.



Gambar 4.43 Lx dan Px pada Ketidakberaturan Sudut Dalam

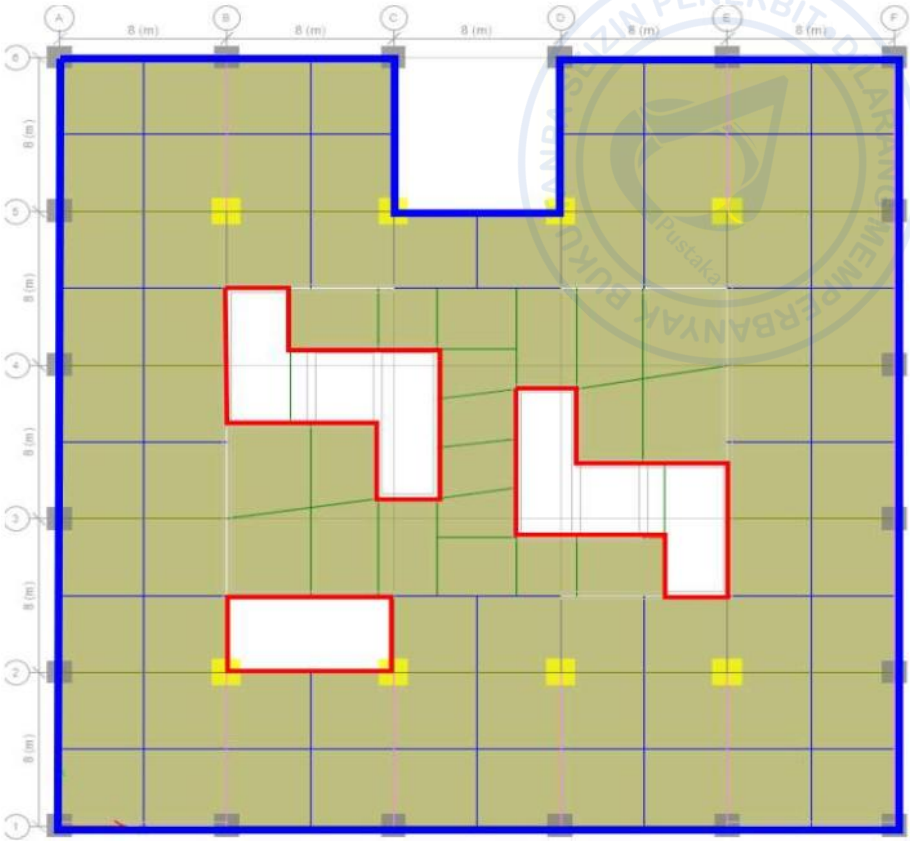
Tabel 4.37
Pengecekan Ketidakberaturan Sudut Dalam

Lx	40	m
Px	8	m
Ly	40	m
Py	8	m
Px/Lx	20%	
Py/Ly	20%	
Cek	H.2	

Dilihat dari hasil perhitungan di atas, diketahui bahwa struktur gedung ini **MEMILIKI KETIDAKBERATURAN SUDUT DALAM**.

c. Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

Cara untuk mengetahui ketidakberaturan diskontinuitas diafragma adalah dengan membagi luasan bukaan dengan luasan total lantai.



Gambar 4.44 Penentuan Luasan Bukaan

Tabel 4.38
Pengecekan Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Syarat 1		
A_{total}	1600	m^2
A_{bukaan}	215.88	m^2
Cek	**TIDAK MEMILIKI**	

Dilihat dari hasil perhitungan di atas, diketahui bahwa struktur gedung ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN DISKONTINUITAS DIAFRAGMA.**

d. Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang

Didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral. Misalnya terdapat kolom atau s*hear wall* tumbuh. Jika dilihat dari denah dan portal, struktur gedung ini **TIDAK**

MEMILIKI KETIDAKBERATURAN AKIBAT PERGESERAN TEGAK LURUS TERHADAP BIDANG.

e. Ketidakberaturan sistem nonparalel

Didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik. Jika dilihat dari denah dan portal, struktur gedung ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN SISTEM NONPARALEL**.

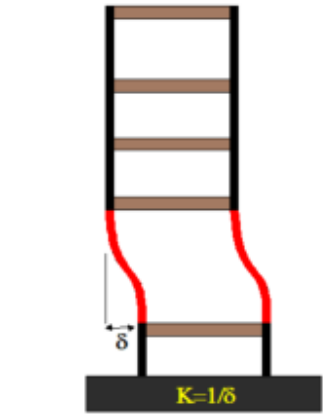
9. Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal

Ketidakberaturan vertikal dalam perencanaan ketahanan gempa merujuk pada kondisi struktur bangunan gedung atau nongedung yang menunjukkan ketidakmerataan distribusi kekakuan, massa, geometri, atau kekuatan secara vertikal, yang dapat menyebabkan respons seismik tidak seragam dan meningkatkan risiko kerusakan selama gempa. Menurut Tabel 14 SNI 1726:2019, ketidakberaturan ini diklasifikasikan untuk memastikan bahwa desain struktur memperhitungkan potensi amplifikasi beban gempa akibat variasi tersebut, khususnya pada kategori desain seismik yang lebih tinggi. Klasifikasi ini bertujuan untuk mencegah kegagalan progresif pada tingkat-tingkat bangunan, dengan menekankan analisis yang lebih mendalam seperti analisis modal atau *time history* pada struktur yang teridentifikasi tidak beraturan. Ketidakberaturan vertikal sering muncul pada bangunan dengan perubahan signifikan pada elevasi, seperti penurunan kekakuan pada tingkat dasar atau penambahan massa pada lantai atas, yang dapat memicu konsentrasi deformasi.

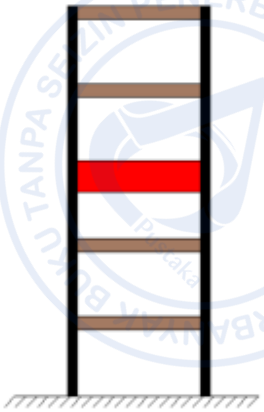
Ketidakberaturan vertikal dibagi menjadi beberapa tipe, di antaranya tipe 1a atau ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak, yang terjadi ketika kekakuan lateral suatu tingkat kurang dari 70% kekakuan tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Tipe 1b, yaitu ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan, didefinisikan ketika kekakuan lateral tingkat tersebut kurang dari 60% kekakuan tingkat di atasnya atau kurang dari 70% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.

Tabel 4.39
Ketidakberaturan Vertikal

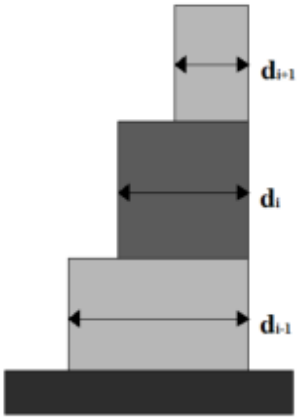
	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan kategori desain seismik
1a.	**Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak** didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D, E, dan F
1b.	**Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan** didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	0 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
2.	**Ketidakberaturan Berat (Massa)** didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E, dan F
3.	**Ketidakberaturan Geometri Vertikal** didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	D, E, dan F
4.	**Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral** didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	0 0 Tabel 16	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	**Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat** didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
5b.	**Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat** didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	0 0 Tabel 16	D, E, dan F B dan C D, E, dan F



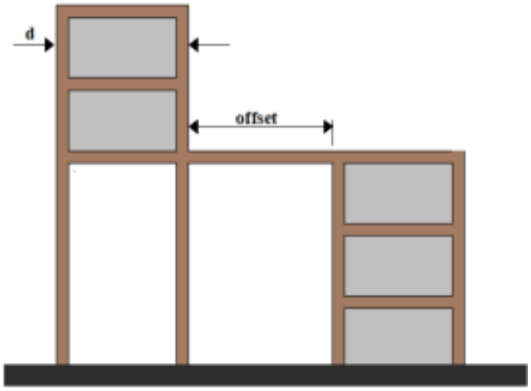
(a) Ketidakberaturan 1a dan 1b



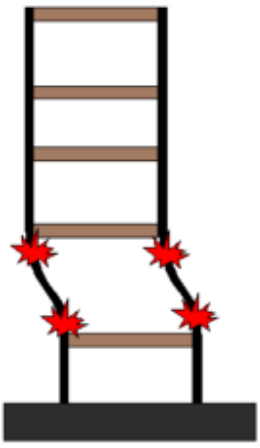
(b) Ketidakberaturan 2



(c) Ketidakberaturan 3

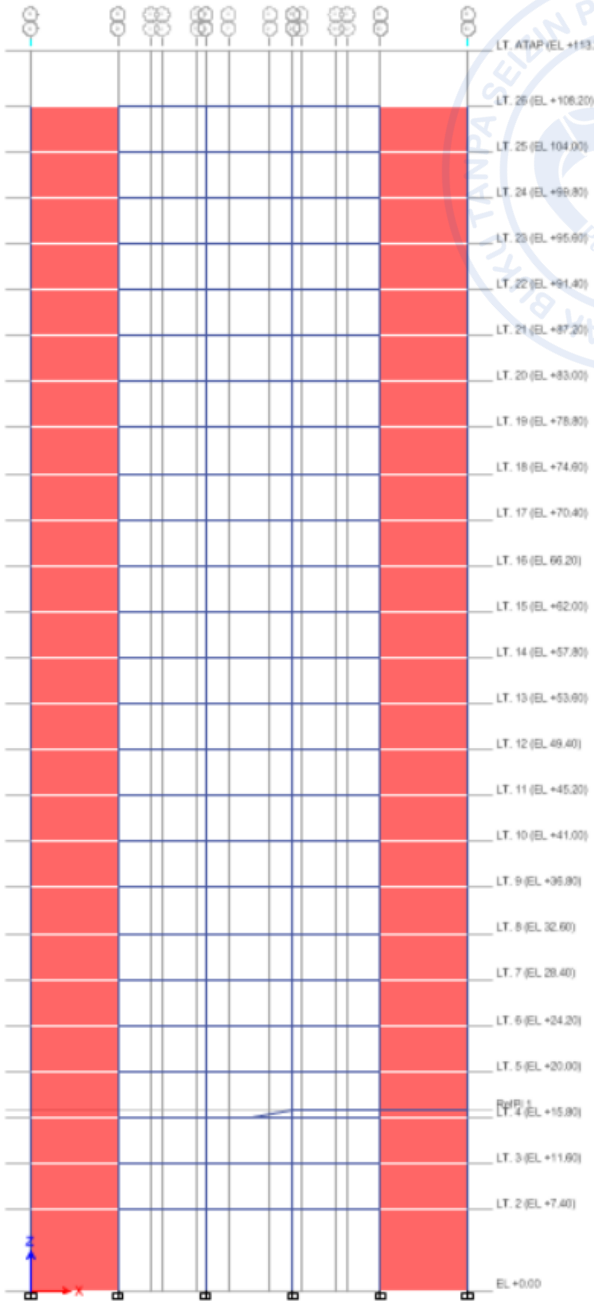


(d) Ketidakberaturan 4



(e) Ketidakberaturan 5a dan 5b

Gambar 4.45 Bentuk-Bentuk Ketidakberaturan Vertikal



Gambar 4.46 Portal Bangunan

a. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak

Untuk melakukan pengecekan ketidakberaturan torsi, terlebih dahulu kita harus mengetahui nilai rasio antar tingkatnya. Caranya adalah klik Ctrl + T → *Analysis Results* → *Structure Output* → *Other Output Items* → *Table: Story Stiffness* → pilih *Load Pattern* RS – X, RS – Y, SE – X dan SE – Y → pilih *Load Cases RS – X Scaled, RS – Y Scaled,* SE – X dan SE – Y → *OK*. Lalu klik kanan pada kolom *Output Case* → *RS – X Scaled* dan juga *RS – Y Scaled.*

Tabel 4.40

Story Stiffness on RS – X Scaled

Story Stiffness

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-X Scaled')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Shear X kN	Drift X mm	Stiff X kN/m	Shear Y kN	Drift Y mm	Stiff Y kN/m
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec		1150.1457	8.912	129054.417	111.1303	0.558	0
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec		4261.1303	7.562	563490.541	427.1006	0.471	907293.322
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec		6347.0477	7.646	830077.939	648.3713	0.477	1360373.273
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec		7839.6579	7.717	1015876.419	813.2427	0.479	1698076.051
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec		8858.0723	7.777	1138962.373	924.8389	0.479	1931369.92
LT. 22 (EL +91...	RS-X Scaled	LinRespSpec		9511.0999	7.816	1216898.524	985.8941	0.475	2074693.965
LT. 21 (EL +87...	RS-X Scaled	LinRespSpec		9890.6175	7.829	1263341.205	1000.9527	0.468	2138888.349
LT. 20 (EL +83...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10073.1087	7.814	1289066.79	976.8016	0.457	0
LT. 19 (EL +78...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10126.1574	7.772	1302951.548	922.1868	0.444	0
LT. 18 (EL +74...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10115.5466	7.702	1313316.736	847.5177	0.429	0
LT. 17 (EL +70...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10108.7259	7.608	1328759.44	765.2133	0.412	0
LT. 16 (EL 66....	RS-X Scaled	LinRespSpec		10172.3041	7.489	1358237.491	690.8067	0.396	0
LT. 15 (EL +62...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10363.9994	7.348	1410402.75	643.4439	0.381	0
LT. 14 (EL +57...	RS-X Scaled	LinRespSpec		10722.48	7.184	1492473.091	641.8124	0.369	0
LT. 13 (EL +53...	RS-X Scaled	LinRespSpec		11262.7065	6.995	1610143.637	694.3473	0.359	0
LT. 12 (EL 49....	RS-X Scaled	LinRespSpec		11973.9827	6.778	1766472.724	794.27	0.352	0
LT. 11 (EL +45...	RS-X Scaled	LinRespSpec		12821.6641	6.528	1964229.543	926.014	0.346	0
LT. 10 (EL +41...	RS-X Scaled	LinRespSpec		13762.1215	6.235	2207340.568	1074.6659	0.342	0
LT. 9 (EL +36....	RS-X Scaled	LinRespSpec		14749.4135	5.891	2503669.032	1228.3421	0.335	0
LT. 8 (EL 32.60)	RS-X Scaled	LinRespSpec		15761.7656	5.497	2867135.374	1380.6901	0.326	0
LT. 7 (EL 28.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec		16763.254	5.054	3316655.036	1523.7836	0.312	0
LT. 6 (EL +24....	RS-X Scaled	LinRespSpec		17692.9507	4.527	3908621.031	1647.3726	0.292	0
LT. 5 (EL +20....	RS-X Scaled	LinRespSpec		18531.1096	3.901	4750556.613	1749.0114	0.264	0
LT. 4 (EL +15....	RS-X Scaled	LinRespSpec		19188.4459	3.167	6058673.396	1820.9207	0.227	0
LT. 3 (EL +11....	RS-X Scaled	LinRespSpec		19648.9049	2.311	8502981.133	1866.8121	0.18	0
LT. 2 (EL +7.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec		19988.7882	1.777	11248410.715	1897.6913	0.154	0

Tabel 4.41

Story Stiffness on RS – Y Scaled

Story Stiffness

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-Y Scaled')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Shear X kN	Drift X mm	Stiff X kN/m	Shear Y kN	Drift Y mm	Stiff Y kN/m
LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		109.6878	0.609	0	1163.3174	8.347	139361.267
LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		418.8993	0.517	0	4439.1337	7.017	632585.418
LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		636.1633	0.522	0	6693.928	7.096	943355.784
LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		797.8415	0.524	0	8350.036	7.149	1168079.899
LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		906.338	0.523	0	9509.6499	7.194	1321831.598
LT. 22 (EL +91...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		964.2072	0.518	0	10274.4935	7.219	1423177.632
LT. 21 (EL +87...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		976.235	0.509	0	10737.2521	7.222	1486691.456
LT. 20 (EL +83...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		949.8816	0.496	0	10979.6063	7.201	1524799.455
LT. 19 (EL +78...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		894.8195	0.48	0	11075.5382	7.154	1548056.229
LT. 18 (EL +74...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		822.5218	0.461	0	11096.1905	7.084	1566267.006
LT. 17 (EL +70...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		746.5445	0.441	0	11112.8194	6.992	1589412.959
LT. 16 (EL 66....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		683.3629	0.421	0	11195.2987	6.878	1627743.47
LT. 15 (EL +62...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		651.7842	0.401	0	11405.2857	6.743	1691358.62
LT. 14 (EL +57...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		667.3364	0.384	0	11786.2008	6.589	1788752.394
LT. 13 (EL +53...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		733.8677	0.369	0	12357.4909	6.411	1927488.607
LT. 12 (EL 49....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		842.5154	0.357	0	13111.167	6.219	2109682.779
LT. 11 (EL +45...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		978.6206	0.348	0	14012.6044	5.991	2339046.795
LT. 10 (EL +41...	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1128.8795	0.339	0	15016.4435	5.739	2618184.333
LT. 9 (EL +36....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1282.487	0.33	0	16074.2499	5.442	2953564.949
LT. 8 (EL 32.60)	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1433.5713	0.319	0	17163.597	5.097	3367592.981
LT. 7 (EL 28.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1574.4126	0.304	0	18247.0268	4.713	3871712.793
LT. 6 (EL +24....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1695.0921	0.283	0	19259.0466	4.262	4518332.062
LT. 5 (EL +20....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1793.3148	0.254	0	20179.9851	3.738	5398157.49
LT. 4 (EL +15....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1861.8996	0.215	0	20912.4346	3.134	6673771.735
LT. 3 (EL +11....	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1904.6608	0.165	0	21437.5057	2.423	8849127.421
LT. 2 (EL +7.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec		1932.3994	0.135	0	21834.1458	2.013	10846416.168

Tabel 4.42

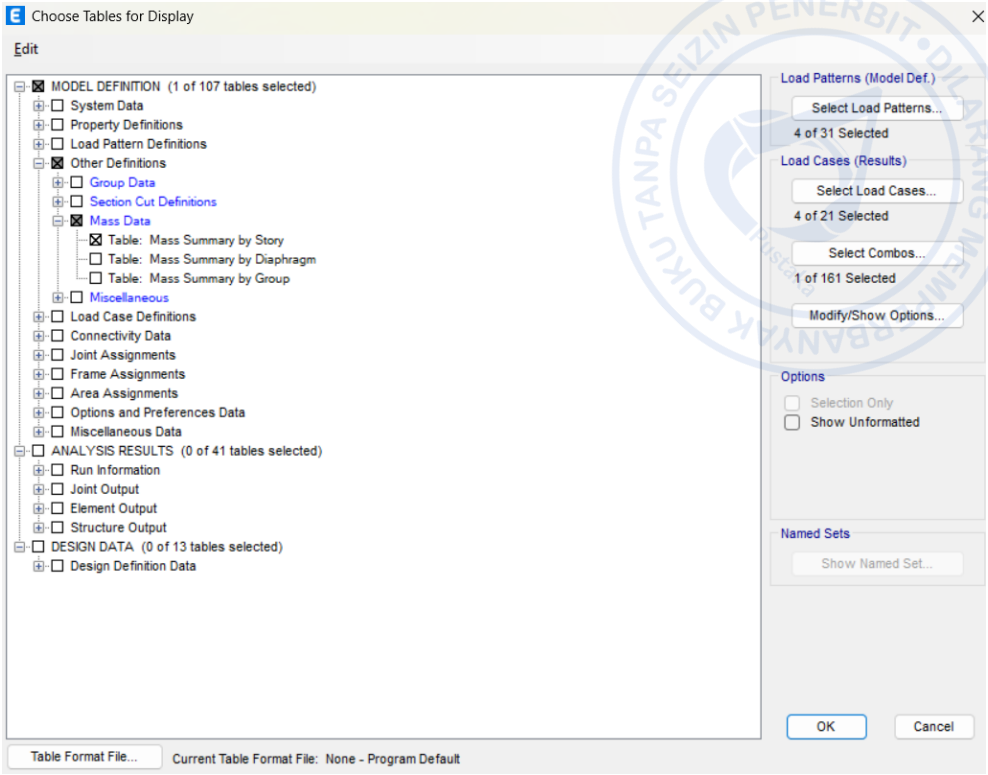
Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekakuan kN/m	Cek	Kekakuan kN/m	Cek
Dak				
26	563490.541	OK	632585.418	OK
25	830077.939	OK	943355.784	OK
24	1015876.419	OK	1168079.899	OK
23	1138962.373	OK	1321831.598	OK
22	1216898.524	OK	1423177.632	OK
21	1263341.205	OK	1486691.456	OK
20	1289066.790	OK	1524799.455	OK
19	1302951.548	OK	1548056.229	OK
18	1313316.736	OK	1566267.006	OK
17	1328759.440	OK	1589412.959	OK
16	1358237.491	OK	1627743.470	OK
15	1410402.750	OK	1691358.620	OK
14	1492473.091	OK	1788752.394	OK
13	1610143.637	OK	1927488.607	OK
12	1766472.724	OK	2109682.779	OK
11	1964229.543	OK	2339046.795	OK
10	2207340.568	OK	2618184.333	OK
9	2503669.032	OK	2953564.949	OK
8	2867135.374	OK	3367592.981	OK
7	3316655.036	OK	3871712.793	OK
6	3908621.031	OK	4518332.062	OK
5	4750556.613	OK	5398157.490	OK
4	6058673.396	OK	6673771.735	OK
3	8502981.133	OK	8849127.421	OK
2	11248410.715	OK	10846416.168	OK

Dapat disimpulkan dari hasil perhitungan pada tabel di atas, diketahui bahwa struktur gedung kantor ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN KEKAKUAN. TINGKAT LUNAK 1a DAN 1b**.

b. Ketidakberaturan massa

Untuk melakukan pengecekan ketidakberaturan torsi, terlebih dahulu kita harus mengetahui nilai rasio antar tingkatnya. Caranya adalah klik Ctrl + T → *Model Definition*→ *Other Definition* → *Mass Data* → *Table: Mass Summary by Story* → pilih *Load Pattern* RS – X, RS – Y, SE – X dan SE – Y → pilih *Load Cases RS – X Scaled, RS – Y Scaled*, SE – X dan SE – Y → OK. Lalu klik kanan pada kolom *Output Case* → *RS – X Scaled* dan *juga RS – Y Scaled.*



Gambar 4.47 *Choose Table for Display*

Tabel 4.43

Mass Summary by Story

Mass Summary by Story

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None
Filter: None

	Story	UX kg	UY kg	UZ kg
▶	LT. ATAP (EL ...	593431.78	593431.78	0
	LT. 26 (EL +10...	2154569.31	2154569.31	0
	LT. 25 (EL 104...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 24 (EL +99...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 23 (EL +95...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 22 (EL +91...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 21 (EL +87...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 20 (EL +83...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 19 (EL +78...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 18 (EL +74...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 17 (EL +70...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 16 (EL 66....	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 15 (EL +62...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 14 (EL +57...	1926908.49	1926908.49	0
	LT. 13 (EL +53...	1932959.15	1932959.15	0
	LT. 12 (EL 49....	1940080.3	1940080.3	0
	LT. 11 (EL +45...	1940080.3	1940080.3	0
	LT. 10 (EL +41...	1940080.3	1940080.3	0
	LT. 9 (EL +36....	1940080.3	1940080.3	0
	LT. 8 (EL 32.60)	1979386.3	1979386.3	0
	LT. 7 (EL 28.40)	2023579.36	2023579.36	0
	LT. 6 (EL +24....	2023579.36	2023579.36	0
	LT. 5 (EL +20....	2085658.95	2085658.95	0
	LT. 4 (EL +15....	1997161.19	1997161.19	0
	LT. 3 (EL +11....	1969172.41	1969172.41	0
	LT. 2 (EL +7.40)	2573828.15	2573828.15	0
	EL +0.00	1159151.78	1159151.78	0

Lalu salin data UX atau UY ke dalam *sheet* Excel yang telah dibuat berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 14.

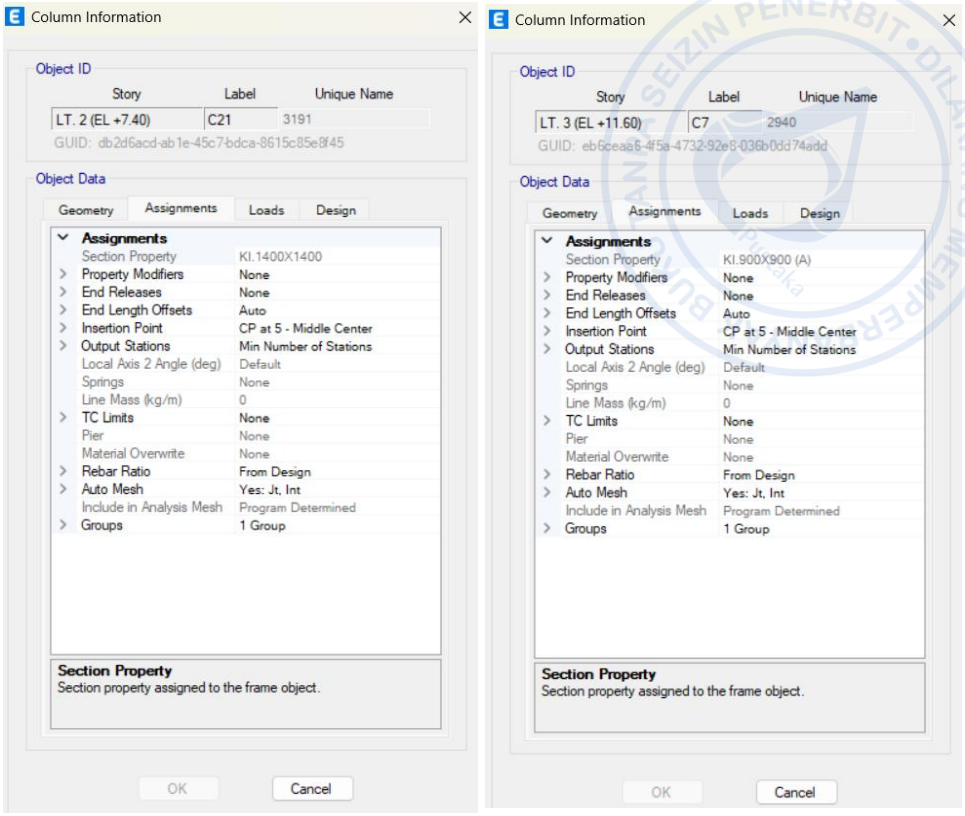
Tabel 4.44
Pengecekan Ketidakberaturan Massa

Lantai	Massa kg	Cek
Dak		
26	2154569.31	V.2
25	1926908.49	OK
24	1926908.49	OK
23	1926908.49	OK
22	1926908.49	OK
21	1926908.49	OK
20	1926908.49	OK
19	1926908.49	OK
18	1926908.49	OK
17	1926908.49	OK
16	1926908.49	OK
15	1926908.49	OK
14	1926908.49	OK
13	1932959.15	OK
12	1940080.3	OK
11	1940080.3	OK
10	1940080.3	OK
9	1940080.3	OK
8	1979386.3	OK
7	2023579.36	OK
6	2023579.36	OK
5	2085658.95	OK
4	1997161.19	OK
3	1969172.41	OK
2	2573828.15	V.2

Dapat disimpulkan dari hasil perhitungan pada tabel di atas, diketahui bahwa struktur gedung kantor ini **MEMILIKI KETIDAKBERATURAN MASSA**.

c. Ketidakberaturan geometri vertikal

Untuk mengetahui apakah struktur kita memiliki ketidakberaturan geometri vertikal, biasanya kembalikan model ke bentuk 3 dimensi dengan klik ikon 3d pada ETABS. Setelah itu, cek dimensi kolom yang digunakan mulai dari lantai dasar sampai lantai 26. Caranya klik kanan pada salah satu kolom di model kita lalu lihat pada bagian *Assignments* → *Section Property*. Dilihat dari gambar di bawah, dapat disimpulkan bahwa ukuran kolom yang digunakan pada lantai dasar adalah kolom 1400 x 1400. Lalu lakukan cara yang sama untuk memeriksa ukuran kolom yang digunakan di lantai atasnya.



Gambar 4.48 *Column Information*

Siapkan *sheet* Excel yang telah dibuat berdasarkan Tabel 14 SNI 1726:2019, lalu salin masing-masing ukuran kolom pada tiap lantainya (kecuali lantai *dak*).

Tabel 4.45
Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Lantai	L mm	Cek
Dak		
26	800	
25	800	OK
24	800	OK
23	800	OK
22	800	OK
21	800	OK
20	800	OK
19	800	OK
18	800	OK
17	800	OK
16	800	OK
15	800	OK
14	800	OK
13	800	OK
12	800	OK
11	800	OK
10	800	OK
9	800	OK
8	900	OK
7	900	OK
6	900	OK
5	900	OK
4	900	OK
3	900	OK
2	900	OK
1	1400	V.3

Dapat disimpulkan dari hasil perhitungan pada tabel di atas, diketahui bahwa struktur gedung kantor ini **MEMILIKI KETIDAKBERATURAN GEOMETRI VERIKAL**.

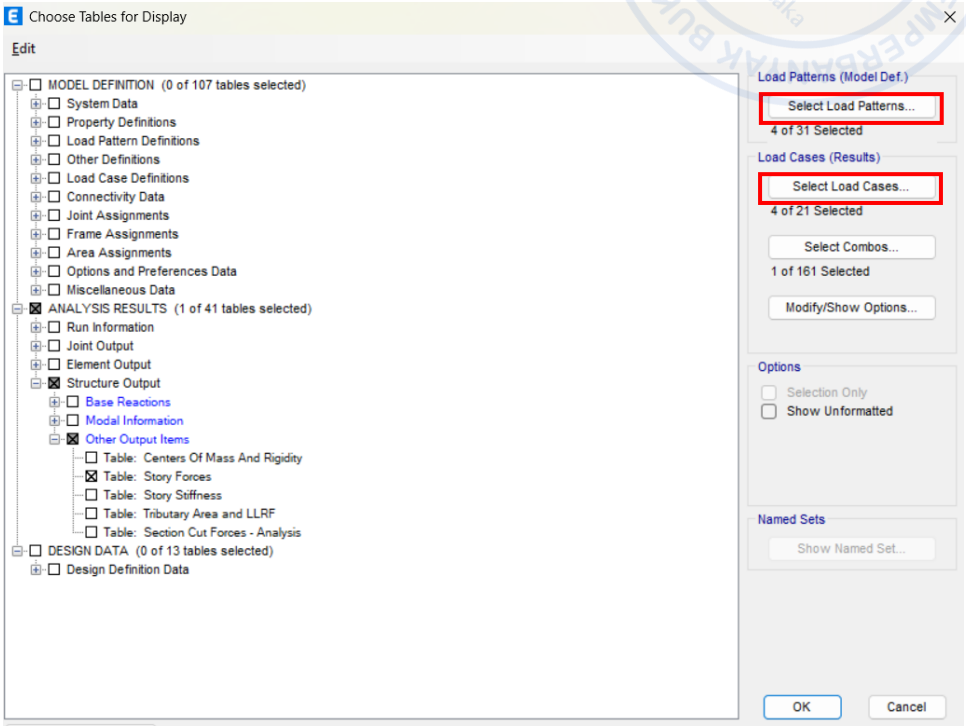
d. Ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal

Untuk mengetahui apakah struktur kita memiliki ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang, salah satunya dapat dilihat melalui portal bangunan. Berdasarkan portal bangunan, struktur gedung ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN AKIBAT DISKONTINUITAS BIDANG** karena tidak ada *shear wall* yang tumbuh di lantai atasnya maupun pergeseran posisi *shear wall* pada satu lantai.

e. Ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan

Untuk melakukan pengecekan ketidakberaturan torsi, terlebih dahulu kita harus mengetahui nilai rasio antar tingkatnya. Caranya adalah klik Ctrl + T → *Analysis Results* → *Structure Output* → *Other Output Items* → *Table:*

Story Forces → pilih *Load Pattern* RS – X, RS – Y, SE – X dan SE – Y → pilih *Load Cases* RS – X *Scaled*, RS – Y *Scaled*, SE – X dan SE – Y → OK. Lalu klik kanan pada kolom *Output Case* → RS – X *Scaled* dan juga RS – Y *Scaled*, dan *Location* pilih Top. Kemudian salin nilai VX dan VY ke dalam *sheet* Excel.



Gambar 4.49 *Choose Table for Display*

Tabel 4.46

RS – X *Scaled Story Forces*

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-X Scaled') AND ([Location] = 'Top')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	1150.1457	111.1303	23964.1931	0	0
LT. 26 (EL +10...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	4261.1303	427.1006	89204.2343	555.6515	5750.7285
LT. 25 (EL 104...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	6347.0477	648.3713	133085.9423	2346.7875	23590.1524
LT. 24 (EL +99...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	7839.6579	813.2427	164597.4633	5062.338	50113.8174
LT. 23 (EL +95...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	8858.0723	924.8389	186068.7642	8461.1823	82701.5653
LT. 22 (EL +91...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	9511.0999	985.8941	199660.7994	12317.9851	119200.3013
LT. 21 (EL +87...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	9890.6175	1000.9527	207268.2768	16417.9505	157890.6048
LT. 20 (EL +83...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	10073.1087	976.8016	210533.4516	20560.4687	197425.7699
LT. 19 (EL +78...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	5.972E-07	10126.1574	922.1868	210943.5364	24565.6075	236767.7272
LT. 18 (EL +74...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	6.563E-07	10115.5466	847.5177	209951.2877	28279.6643	275136.977
LT. 17 (EL +70...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.073E-07	10108.7259	765.2133	209039.3113	31578.3278	311983.6015
LT. 16 (EL 66....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8E-07	10172.3041	690.8067	209670.4238	34367.7327	346977.5444
LT. 15 (EL +62...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.675E-07	10363.9994	643.4439	213118.7741	36584.5936	380010.7422
LT. 14 (EL +57...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.705E-07	10722.48	641.8124	220245.6923	38196.6822	411202.1905
LT. 13 (EL +53...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.009E-06	11262.7065	694.3473	231386.6189	39204.6497	440897.9008
LT. 12 (EL 49....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.063E-06	11973.9827	794.27	246307.8707	39643.5953	469648.9297
LT. 11 (EL +45...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.125E-06	12821.6641	926.014	264248.8306	39591.5647	498197.7546
LT. 10 (EL +41...	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.21E-06	13762.1215	1074.6659	284249.6421	39181.1048	527443.3196
LT. 9 (EL +36....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.299E-06	14749.4135	1228.3421	305299.544	38604.9372	558355.1455
LT. 8 (EL 32.60)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.311E-06	15761.7656	1380.6901	326899.2501	38119.0564	591887.9218
LT. 7 (EL 28.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.348E-06	16763.254	1523.7836	348237.547	38023.6968	628875.9701
LT. 6 (EL +24....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.389E-06	17692.9507	1647.3726	367965.8917	38636.9709	670010.7694
LT. 5 (EL +20....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.408E-06	18513.5624	1746.9583	385209.1797	40225.9289	715774.2963
LT. 4 (EL +15....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.423E-06	19188.4459	1820.9207	398968.1856	42923.4392	766361.7112
LT. 3 (EL +11....	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.439E-06	19648.9049	1866.8121	408317.7992	46705.3671	821676.1144
LT. 2 (EL +7.40)	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	Top	1.367E-06	19988.7882	1897.6913	415188.6354	51424.5102	881323.7762

Tabel 4.47

RS – Y *Scaled Story Forces*

Story Forces

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: ([Output Case] = 'RS-Y Scaled') AND ([Location] = 'Top')

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P kN	VX kN	VY kN	T kN-m	MX kN-m	MY kN-m
LT. ATAP (EL ...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	109.6878	1163.3174	22460.753	1.013E-06	9.317E-07
LT. 26 (EL +10...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	418.8993	4439.1337	85081.0404	5816.5872	548.4389
LT. 25 (EL 104...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	636.1633	6693.928	128052.5797	24431.7642	2302.9546
LT. 24 (EL +99...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	797.8415	8350.036	159451.1593	52455.0957	4965.9842
LT. 23 (EL +95...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	906.338	9509.6499	181447.8896	87264.5224	8300.1284
LT. 22 (EL +91...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	964.2072	10274.4935	196127.7747	126627.9394	12080.1976
LT. 21 (EL +87...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	976.235	10737.2521	205299.841	168708.593	16090.3297
LT. 20 (EL +83...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	949.8816	10979.6063	210484.0472	212034.8151	20129.0308
LT. 19 (EL +78...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	894.8195	11075.5382	213012.5413	255455.0548	24016.954
LT. 18 (EL +74...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	822.5218	11096.1905	214151.7754	298097.0585	27603.1631
LT. 17 (EL +70...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	746.5445	11112.8194	215172.5494	339340.1587	30768.3674
LT. 16 (EL 66....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	683.3629	11195.2987	217326.3261	378802.2937	33425.6931
LT. 15 (EL +62...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	651.7842	11405.2857	221721.5727	416338.0989	35520.4941
LT. 14 (EL +57...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	667.3364	11786.2008	229144.8756	452041.2809	37030.7275
LT. 13 (EL +53...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	0	733.8677	12357.4909	239961.5112	486243.4513	37969.0019
LT. 12 (EL 49....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	5.401E-07	842.5154	13111.167	254047.3113	519491.33	38384.7801
LT. 11 (EL +45...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	6.107E-07	978.6206	14012.6044	270794.5887	552532.0748	38373.6297
LT. 10 (EL +41...	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.207E-07	1128.8795	15016.4435	289398.5894	586276.5334	38088.9583
LT. 9 (EL +36....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	7.654E-07	1282.487	16074.2499	308995.9428	621711.2883	37746.167
LT. 8 (EL 32.60)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.67E-07	1433.5713	17163.597	329208.4033	659812.3938	37620.1427
LT. 7 (EL 28.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.235E-07	1574.4126	18247.0268	349385.9071	701439.6982	38016.3234
LT. 6 (EL +24....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.609E-07	1695.0921	19259.0466	368349.6871	747319.8463	39230.5068
LT. 5 (EL +20....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.514E-07	1791.3912	20160.305	385423.9275	797979.7703	41475.8744
LT. 4 (EL +15....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.641E-07	1861.8996	20912.4346	399988.9235	853662.1237	44819.5745
LT. 3 (EL +11....	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	9.59E-07	1904.6608	21437.5057	410182.3122	914314.2032	49186.3132
LT. 2 (EL +7.40)	RS-Y Scaled	LinRespSpec	Max	Top	8.659E-07	1932.3994	21834.1458	417969.7525	979570.831	54405.8723

Tabel 4.48
Pengecekan Ketidakberaturan Tingkat Lemah

Lantai	Arah X		Arah Y	
	Kekuatan kN	Cek	Kekuatan kN	Cek
Dak				
26	4261.1303	OK	4439.1337	OK
25	6347.0477	OK	6693.9280	OK
24	7839.6579	OK	8350.0360	OK
23	8858.0723	OK	9509.6499	OK
22	9511.0999	OK	10274.4935	OK
21	9890.6175	OK	10737.2521	OK
20	10073.1087	OK	10979.6063	OK
19	10126.1574	OK	11075.5382	OK
18	10115.5466	OK	11096.1905	OK
17	10108.7259	OK	11112.8194	OK
16	10172.3041	OK	11195.2987	OK
15	10363.9994	OK	11405.2857	OK
14	10722.4800	OK	11786.2008	OK
13	11262.7065	OK	12357.4909	OK
12	11973.9827	OK	13111.1670	OK
11	12821.6641	OK	14012.6044	OK
10	13762.1215	OK	15016.4435	OK
9	14749.4135	OK	16074.2499	OK
8	15761.7656	OK	17163.5970	OK
7	16763.2540	OK	18247.0268	OK
6	17692.9507	OK	19259.0466	OK
5	18513.5624	OK	20160.3050	OK
4	19188.4459	OK	20912.4346	OK
3	19648.9049	OK	21437.5057	OK
2	19988.7882	OK	21834.1458	OK

Dapat disimpulkan dari hasil perhitungan pada tabel di atas, diketahui bahwa struktur gedung kantor ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN TINGKAT LEMAH**.

10. Penentuan Fleksibilitas Diafragma

Penentuan fleksibilitas diafragma dalam perencanaan struktur bangunan merupakan aspek penting untuk memastikan distribusi gaya seismik yang tepat, khususnya dalam menghadapi beban gempa. Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.3.1, fleksibilitas diafragma ditentukan berdasarkan kekakuan relatif diafragma terhadap elemen vertikal sistem pemikul gaya lateral, di mana analisis struktur harus memperhitungkan interaksi ini untuk menghindari asumsi yang tidak akurat. Diafragma dapat diklasifikasikan sebagai fleksibel dan kaku, tergantung pada perbandingan simpangan maksimum di tengah bentang diafragma dengan simpangan rata-rata pada penyangga vertikal. Klasifikasi ini memengaruhi metode analisis seismik yang digunakan, seperti apakah diafragma dapat diidealkan sebagai kaku untuk distribusi gaya torsional atau memerlukan pemodelan lebih detail jika fleksibel.

Diafragma harus didesain untuk tegangan geser dan lentur yang dihasilkan dari gaya desain. Pada diskontinuitas diafragma, seperti bukaan dan sudut dalam, desain harus menjamin bahwa disipasi atau transfer gaya tepi (*kord*) terkombinasi dengan gaya lainnya dalam diafragma tidak boleh melebihi kapasitas geser dan tarik diafragma. Diafragma lantai dan atap harus didesain untuk menahan gaya seismik desain dari analisis struktur, tetapi tidak boleh kurang dari yang ditentukan sesuai dengan persamaan (51) SNI 1726:2019 Pasal 7.10.1.1 di bawah.

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^{n} F_i}{\sum_{i=x}^{n} w_i} w_{px}$$

Keterangan:

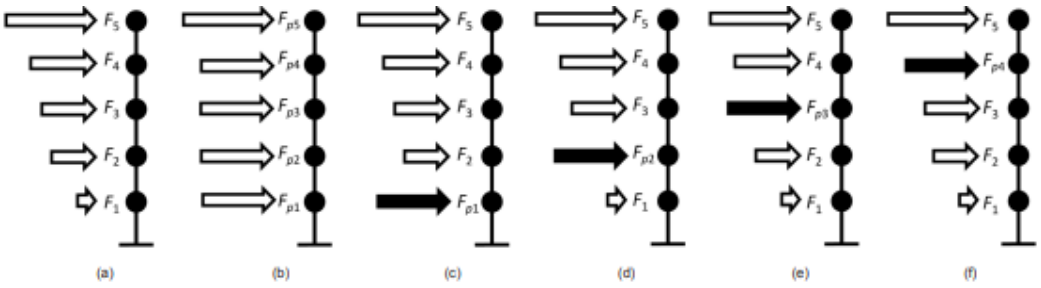
F_{px} = gaya desain diafragma di tingkat-x;
F_i = gaya desain yang diterapkan di tingkat-i
w_i = tributari berat sampai tingkat-i
w_{px} = tributari berat sampai diafragma di tingkat-x

Ada batasan lain setelah mengetahui persamaan gaya desain diafragma, yaitu hasil dari Fpx dari persamaan (51) di atas **tidak boleh kurang** dari Fpx persamaan (52) dan **tidak boleh melebihi** Fpx persamaan (53).

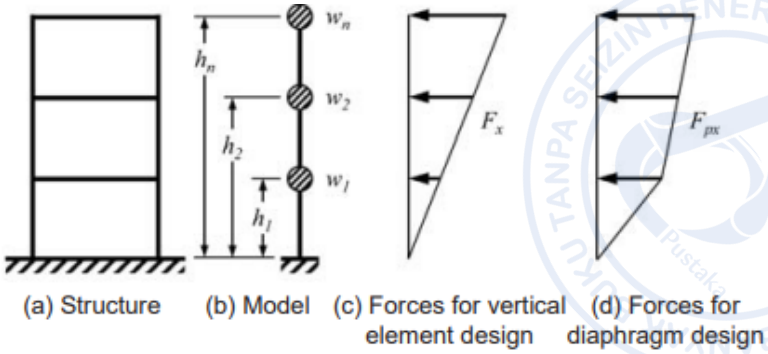
$$F_{px} = 0,2 S_{DS} I_e w_{px}$$

$$F_{px} = 0,4 S_{DS} I_e w_{px}$$

Dengan kata lain, jikalau disederhanakan, maka Fpx (52) ≤ Fpx (51) ≤ Fpx (53). Gaya desain diafragma (Fpx) diaplikasikan per lantai dan lantai lainnya diaplikasikan gaya Fx seperti dianalogikan pada gambar di bawah.



Gambar 4.50 *Vertical Force Distribution with Diaphragm Force*
(Sumber: NEHRP *Seismic Design Technical Brief* No.5)



Gambar 4.51 *Design Forces for Vertical Elements and Diaphragm Force*
(Sumber: NEHRP *Seismic Design Technical Brief* No.3)

Tabel 4.49
Rangkuman Diafragma

Lantai	Elevasi	Wi	Wpx	∑ Wi	Fi (x)	Fi (y)	∑ Fi (x)	∑ Fi (y)	Fp (x)	Fp (y)	Fp min	Fp max	Fp (x)	Fp (y)
		kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
LT. 26	EL + 108.2	14722.12	10606.68	10606.68	1687.20	1756.97	1687.20	1756.97	1687.20	1756.97	1468.81	2937.62	1687.20	1756.97
LT. 25	EL + 104	12321.61	9112.76	19719.43	1293.14	1346.62	2980.33	3103.59	1377.27	1434.23	1261.93	2523.87	1377.27	1434.23
LT. 24	EL + 99.8	12321.85	9112.77	28832.20	1190.80	1240.05	4171.13	4343.64	1318.34	1372.86	1261.94	2523.87	1318.34	1372.86
LT. 23	EL + 95.6	12321.55	9112.77	37944.97	1092.68	1137.87	5263.81	5481.51	1264.14	1316.43	1261.94	2523.87	1264.14	1316.43
LT. 22	EL + 91.4	12321.99	9112.78	47057.75	998.78	1040.09	6262.59	6521.60	1212.76	1262.91	1261.94	2523.87	1261.94	1262.91
LT. 21	EL + 87.2	12321.62	9112.81	56170.56	909.10	946.70	7171.69	7468.30	1163.50	1211.62	1261.94	2523.88	1261.94	1261.94
LT. 20	EL + 83	12321.65	9112.86	65283.42	823.63	857.70	7995.33	8325.99	1116.06	1162.22	1261.95	2523.90	1261.95	1261.95
LT. 19	EL + 78.8	12321.75	9112.94	74396.36	742.39	773.09	8737.71	9099.08	1070.30	1114.56	1261.96	2523.92	1261.96	1261.96
LT. 18	EL + 74.6	12321.60	9113.04	83509.40	665.36	692.88	9403.07	9791.96	1026.12	1068.56	1261.97	2523.95	1261.97	1261.97
LT. 17	EL + 70.4	12466.06	9081.86	92591.26	601.53	626.41	10004.60	10418.37	981.31	1021.89	1257.66	2515.31	1257.66	1257.66
LT. 16	EL + 66.2	12716.23	9082.74	101673.99	540.72	563.09	10545.32	10981.45	942.03	980.99	1257.78	2515.55	1257.78	1257.78
LT. 15	EL + 62	12716.83	9082.96	110756.95	474.29	493.90	11019.61	11475.36	903.70	941.07	1257.81	2515.62	1257.81	1257.81
LT. 14	EL + 57.8	12716.76	9083.22	119840.17	412.21	429.26	11431.82	11904.61	866.47	902.30	1257.84	2515.69	1257.84	1257.84
LT. 13	EL + 53.6	12716.81	9083.52	128923.69	354.48	369.14	11786.30	12273.75	830.42	864.77	1257.89	2515.77	1257.89	1257.89
LT. 12	EL + 49.4	12716.90	9083.84	138007.53	301.10	313.55	12087.40	12587.31	795.61	828.51	1257.93	2515.86	1257.93	1257.93
LT. 11	EL + 45.2	12896.72	9051.46	147058.99	256.30	266.90	12343.70	12854.21	759.75	791.17	1253.45	2506.89	1253.45	1253.45
LT. 10	EL + 41	13173.63	9052.21	156111.20	214.86	223.75	12558.57	13077.96	728.22	758.33	1253.55	2507.10	1253.55	1253.55
LT. 9	EL + 36.8	13173.67	9053.03	165164.23	173.10	180.26	12731.66	13258.22	697.85	726.71	1253.66	2507.33	1253.66	1253.66
LT. 8	EL + 32.6	13423.93	8997.81	174162.04	139.13	144.89	12870.79	13403.10	664.95	692.45	1246.02	2492.03	1246.02	1246.02
LT. 7	EL + 28.4	14029.01	8933.79	183095.83	110.22	114.78	12981.01	13517.88	633.38	659.58	1237.15	2474.30	1237.15	1237.15
LT. 6	EL + 24.2	14354.70	8934.76	192030.60	81.56	84.93	13062.57	13602.81	607.77	632.91	1237.29	2474.57	1237.29	1237.29
LT. 5	EL + 20	14355.14	8934.38	200964.98	56.20	58.52	13118.77	13661.33	583.23	607.35	1237.23	2474.47	1237.23	1237.23
LT. 4	EL + 15.8	13608.29	8345.44	209310.42	34.98	36.43	13153.75	13697.76	524.45	546.14	1155.68	2311.35	1155.68	1155.68
LT. 3	EL + 11.6	13939.56	8617.57	217927.98	18.20	18.95	13171.95	13716.71	520.86	542.40	1193.36	2386.72	1193.36	1193.36
LT. 2	EL + 7.4	16905.23	8613.89	226541.87	8.98	9.35	13180.93	13726.07	501.18	521.91	1192.85	2385.70	1192.85	1192.85

Dirunut dari rumus Pasal 7.3.1.1 sampai 7.3.1.3 kita harus menyiapkan *sheet* Excel berdasarkan rumus tersebut di atas.

Tabel 4.50
Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah X dengan Meninjau Dimensi Diafragma (S/De)

Penentuan Fleksibilitas Diafragma (I)
Arah Gempa X

Proyek: **Rusun Kelapa Gading**
Bangunan: **Rumah Susun**

I. Penentuan Fleksibilitas Diafragma Dengan Tinjauan Dimensi Diafragma (S/De)

S = Dimensi Bangunan Tergak Lurus Arah Gaya Gempa
De = Dimensi Bangunan Sejajar Arah Gaya Gempa

n	Story	S	De	S/De
		(m)	(m)	
26	Dak	40	40	1.00
25	26	40	40	1.00
24	25	40	40	1.00
23	24	40	40	1.00
22	23	40	40	1.00
21	22	40	40	1.00
20	21	40	40	1.00
19	20	40	40	1.00
18	19	40	40	1.00
17	18	40	40	1.00
16	17	40	40	1.00
15	16	40	40	1.00
14	15	40	40	1.00
13	14	40	40	1.00
12	13	40	40	1.00
11	12	40	40	1.00
10	11	40	40	1.00
9	10	40	40	1.00
8	9	40	40	1.00
7	8	40	40	1.00
6	7	40	40	1.00
5	6	40	40	1.00
4	5	40	40	1.00
3	4	40	40	1.00
2	3	40	40	1.00
1	2	40	40	1.00
0	Base	40	40	1.00

Nilai S/De kurang dari 3, tetapi terdapat ketidakberaturan horizontal, sehingga idealisasi diafragma kaku tidak dapat digunakan, penentuan fleksibilitas diafragma ditentukan dengan tinjauan defleksi diafragma

Page 1

Tabel 4.51
Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah Y dengan Meninjau Dimensi Diafragma (S/De)

Penentuan Fleksibilitas Diafragma (I)
Arah Gempa Y

Proyek: **Rusun Kelapa Gading**
Bangunan: **Rumah Susun**

I. Penentuan Fleksibilitas Diafragma Dengan Tinjauan Dimensi Diafragma (S/De)

S = Dimensi Bangunan Tergak Lurus Arah Gaya Gempa
De = Dimensi Bangunan Sejajar Arah Gaya Gempa

n	Story	S (m)	De (m)	S/De
26	Dak	40	40	1.00
25	26	40	40	1.00
24	25	40	40	1.00
23	24	40	40	1.00
22	23	40	40	1.00
21	22	40	40	1.00
20	21	40	40	1.00
19	20	40	40	1.00
18	19	40	40	1.00
17	18	40	40	1.00
16	17	40	40	1.00
15	16	40	40	1.00
14	15	40	40	1.00
13	14	40	40	1.00
12	13	40	40	1.00
11	12	40	40	1.00
10	11	40	40	1.00
9	10	40	40	1.00
8	9	40	40	1.00
7	8	40	40	1.00
6	7	40	40	1.00
5	6	40	40	1.00
4	5	40	40	1.00
3	4	40	40	1.00
2	3	40	40	1.00
1	2	40	40	1.00
0	Base	40	40	1.00

Nilai S/De kurang dari 3, tetapi terdapat ketidakberaturan horizontal, sehingga idealisasi diafragma kaku tidak dapat digunakan, penentuan fleksibilitas diafragma ditentukan dengan tinjauan defleksi diafragma

Page 2

Dapat dilihat dari kesimpulan yang ada di dalam tabel bahwa fleksibilitas ditentukan dengan cara defleksi diafragma.

Tabel 4.52

Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah X dengan Meninjau Defleksi Diafragma

Penentuan Fleksibilitas Diafragma (I)

Arah Gempa X

Proyek: Rusun Kelapa Gading

Bangunan: Rumah Susun

II. Penentuan Fleksibilitas Diafragma Dengan Tinjauan Defleksi Diafragma

Syarat: DDM > 2SREV

DDM = Defleksi diafragma maksimum

SERV = Simpangan antar lantai rata-rata elemen vertikal

n	Story	Elevation	h_i	DDM	Simpangan Antar Lantai El. Yertikal			Hasil
					d_x	SERV	2SERV	
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
26	Dak	113.2	5	0.1593	0.1596	0.1550	0.3099	Semi Rigid
25	26	108.2	4.2	0.1509	0.1504	0.1473	0.2946	Semi Rigid
24	25	104.0	4.2	0.1437	0.1442	0.1406	0.2812	Semi Rigid
23	24	99.8	4.2	0.1365	0.1370	0.1334	0.2668	Semi Rigid
22	23	95.6	4.2	0.1293	0.1298	0.1261	0.2523	Semi Rigid
21	22	91.4	4.2	0.1221	0.1225	0.1189	0.2377	Semi Rigid
20	21	87.2	4.2	0.1148	0.1152	0.1116	0.2232	Semi Rigid
19	20	83.0	4.2	0.1076	0.1079	0.1043	0.2086	Semi Rigid
18	19	78.8	4.2	0.1003	0.1007	0.0970	0.1941	Semi Rigid
17	18	74.6	4.2	0.0931	0.0934	0.0898	0.1796	Semi Rigid
16	17	70.4	4.2	0.0859	0.0862	0.0826	0.1652	Semi Rigid
15	16	66.2	4.2	0.0787	0.0790	0.0755	0.1509	Semi Rigid
14	15	62.0	4.2	0.0716	0.0719	0.0684	0.1368	Semi Rigid
13	14	57.8	4.2	0.0647	0.0649	0.0614	0.1229	Semi Rigid
12	13	53.6	4.2	0.0578	0.0580	0.0546	0.1092	Semi Rigid
11	12	49.4	4.2	0.0510	0.0512	0.0479	0.0958	Semi Rigid
10	11	45.2	4.2	0.0444	0.0446	0.0414	0.0828	Semi Rigid
9	10	41.0	4.2	0.0381	0.0382	0.0351	0.0703	Semi Rigid
8	9	36.8	4.2	0.0319	0.0321	0.0291	0.0583	Semi Rigid
7	8	32.6	4.2	0.0261	0.0262	0.0235	0.0470	Semi Rigid
6	7	28.4	4.2	0.0207	0.0208	0.0182	0.0365	Semi Rigid
5	6	24.2	4.2	0.0156	0.0157	0.0134	0.0269	Semi Rigid
4	5	20.0	4.2	0.0111	0.0112	0.0092	0.0185	Semi Rigid
3	4	15.8	4.2	0.0072	0.0073	0.0057	0.0114	Semi Rigid
2	3	11.6	4.2	0.0041	0.0041	0.0029	0.0059	Semi Rigid
1	2	7.4	7.4	0.0018	0.0018	0.0009	0.0018	Semi Rigid
0	Base	0		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Semi Rigid

Berdasarkan pengecekan Fleksibilitas Diafragma di atas maka diambil diafragma **Semi Rigid**

Page 3

Tabel 4.53
Perhitungan Fleksibilitas Diafragma Arah Y dengan Meninjau Defleksi Diafragma

Penentuan Fleksibilitas Diafragma (I)
Arah Gempa Y

Proyek: Rusun Kelapa Gading
Bangunan: Rumah Susun

II. Penentuan Fleksibilitas Diafragma Dengan Tinjauan Defleksi Diafragma

Syarat: DDM > 2SREV
DDM = Defleksi diafragma maksimum
SERV = Simpangan antar lantai rata-rata elemen vertikal

n	Story	Elevation	h_i	DDM	Simpangan Antar Lantai El. Vertikal			Hasil
						SERV	2SERV	
			(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
26	Dak	113.2	5	0.1488	0.1489	0.1449	0.2899	Semi Rigid
25	26	108.2	4.2	0.1408	0.1410	0.1376	0.2753	Semi Rigid
24	25	104.0	4.2	0.1341	0.1343	0.1309	0.2618	Semi Rigid
23	24	99.8	4.2	0.1273	0.1275	0.1242	0.2483	Semi Rigid
22	23	95.6	4.2	0.1206	0.1208	0.1174	0.2348	Semi Rigid
21	22	91.4	4.2	0.1138	0.1140	0.1106	0.2213	Semi Rigid
20	21	87.2	4.2	0.1071	0.1072	0.1039	0.2077	Semi Rigid
19	20	83.0	4.2	0.1003	0.1005	0.0971	0.1942	Semi Rigid
18	19	78.8	4.2	0.0936	0.0937	0.0904	0.1807	Semi Rigid
17	18	74.6	4.2	0.0869	0.0870	0.0837	0.1673	Semi Rigid
16	17	70.4	4.2	0.0802	0.0803	0.0770	0.1541	Semi Rigid
15	16	66.2	4.2	0.0736	0.0737	0.0705	0.1409	Semi Rigid
14	15	62.0	4.2	0.0671	0.0672	0.0640	0.1279	Semi Rigid
13	14	57.8	4.2	0.0606	0.0607	0.0576	0.1151	Semi Rigid
12	13	53.6	4.2	0.0543	0.0544	0.0513	0.1026	Semi Rigid
11	12	49.4	4.2	0.0481	0.0482	0.0452	0.0904	Semi Rigid
10	11	45.2	4.2	0.0421	0.0422	0.0392	0.0784	Semi Rigid
9	10	41.0	4.2	0.0362	0.0363	0.0335	0.0670	Semi Rigid
8	9	36.8	4.2	0.0306	0.0307	0.0280	0.0559	Semi Rigid
7	8	32.6	4.2	0.0252	0.0253	0.0228	0.0455	Semi Rigid
6	7	28.4	4.2	0.0202	0.0202	0.0179	0.0358	Semi Rigid
5	6	24.2	4.2	0.0155	0.0155	0.0134	0.0269	Semi Rigid
4	5	20.0	4.2	0.0113	0.0113	0.0094	0.0189	Semi Rigid
3	4	15.8	4.2	0.0076	0.0076	0.0060	0.0120	Semi Rigid
2	3	11.6	4.2	0.0044	0.0044	0.0032	0.0065	Semi Rigid
1	2	7.4	7.4	0.0020	0.0020	0.0010	0.0020	Semi Rigid
0	0	0		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	Semi Rigid

Berdasarkan pengecekan Fleksibilitas Diafragma di atas maka diambil diafragma **Semi Rigid**

Page 4

Berdasarkan rekapan yang telah penulis buat, di bawah ini adalah hasil perhitungan fleksibilitas diafragma sekaligus menyimpulkan bahwa diafragma yang digunakan adalah *semi rigid*.

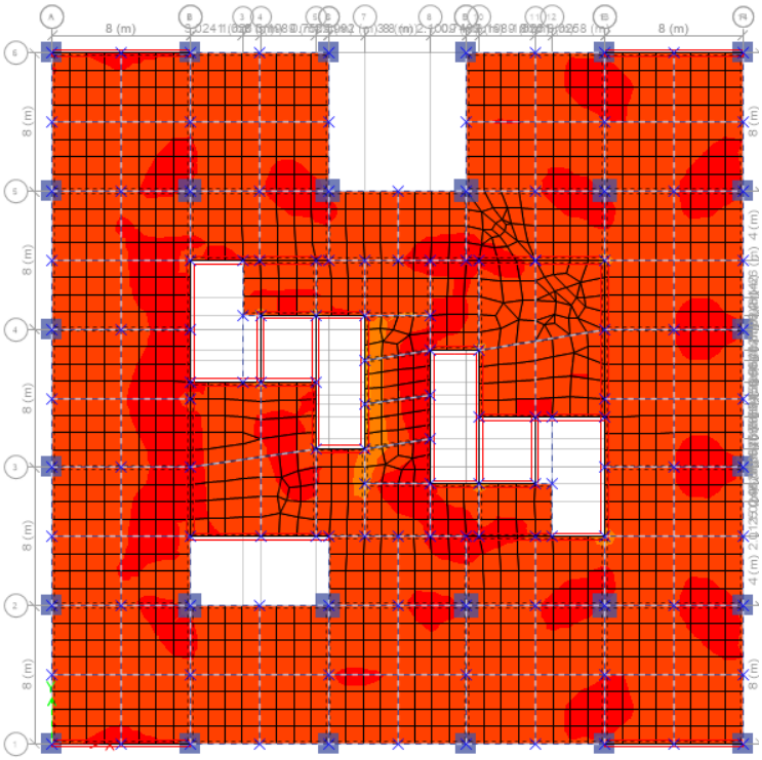
11. Penentuan Tulangan Kord

Tulangan *kord* dalam SNI 1726:2019 merujuk pada tulangan tambahan yang dirancang untuk menahan gaya tarik dan tekan akibat beban gempa pada elemen diafragma horizontal, seperti pelat lantai atau atap, yang berfungsi sebagai elemen penyalur gaya lateral ke sistem penahan gempa vertikal. Tulangan *kord* ini ditempatkan di sepanjang tepi diafragma untuk membentuk sistem penahan gaya yang efektif, terutama pada struktur dengan bukaan besar atau

ketidakberaturan yang memengaruhi distribusi gaya. Ketentuan ini bertujuan untuk memastikan bahwa diafragma dapat mentransfer gaya geser dan momen ke elemen vertikal seperti kolom atau dinding geser tanpa mengalami kegagalan lokal, meningkatkan integritas keseluruhan struktur selama gempa.

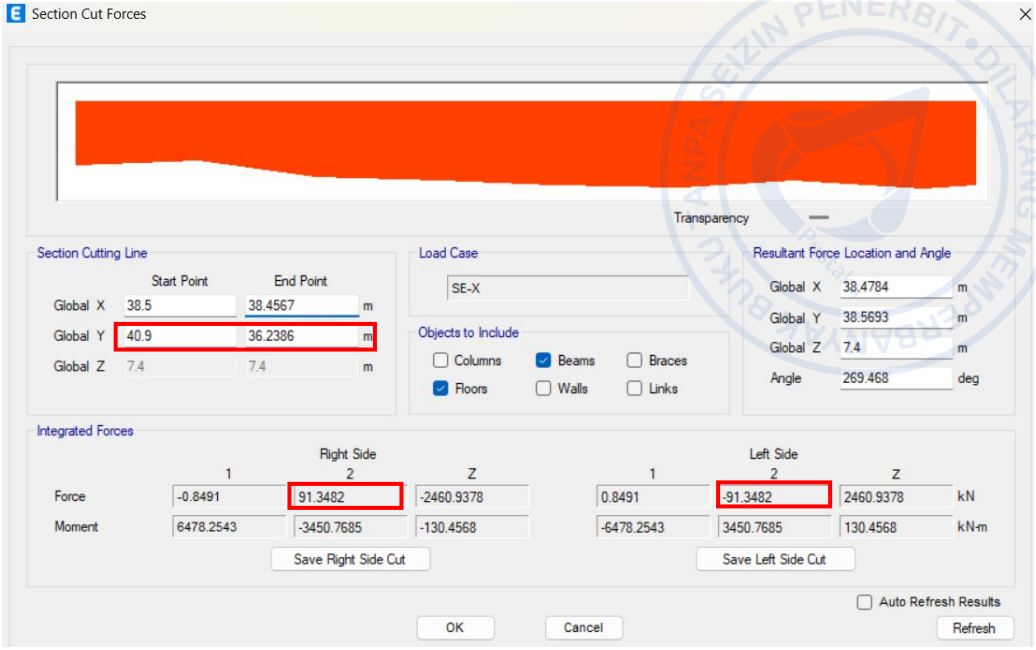
Tulangan *kord* juga berperan dalam mengatasi efek torsi yang timbul dari ketidakberaturan horizontal, seperti sudut *reentrant* atau diskontinuitas, dengan menempatkan tulangan tambahan di sepanjang garis *kord* untuk menyeimbangkan momen. Jarak dan diameter tulangan *kord* harus disesuaikan dengan panjang efektif diafragma dan gaya yang ditransfer, dengan *anchorage* yang memadai untuk mencegah *pull-out*. Ketentuan ini diintegrasikan dengan analisis dinamis jika struktur memiliki periode panjang atau massa tidak merata, memastikan bahwa *kord* dapat menahan beban siklik tanpa kerusakan signifikan.

Untuk mengetahui berapa jumlah tulangan tambahan tepi yang akan dipasang pada diafragma, caranya adalah tinjau salah satu lantainya, lalu klik F9 → *Case* pilih yang SE – X atau SE – Y → *Component* Mmax → OK.



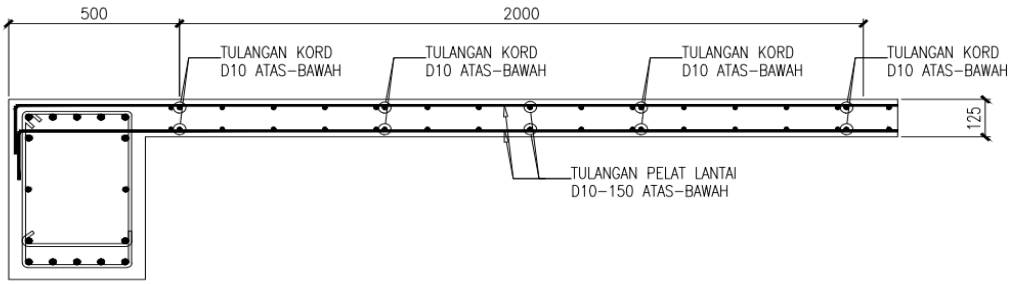
Gambar 4.52 Warna Momen Pelat Lantai

Selanjutnya adalah ke menu *Draw* → *Draw Section Cut*, lalu tarik garis memanjang pada tepi lantai tersebut. Di bawah ini adalah hasil *section cut*.



Gambar 4.53 *Section Cut Forces* untuk Tulangan Kord

Gaya tarik yang terjadi adalah 91,35 kN, maka As = Tu/(Ø*fy) = 9.135.000 N/(0,9*420) = 243,39 mm2. Dari hasil As perlu tersebut akan dipasang 3 buah tulangan D10 mm. Untuk mengetahui batas izin tekan yang terjadi, bisa dilihat di Pasal 18.12.7.5 SNI 2847:2019. Diketahui bahwa batas izin tekan adalah 0,2*fc*Apelat = 0,2*30*(40,-36,24)*1000*125 = 3.503 kN. Jika dibandingkan gaya tekan yang terjadi yaitu sebesar 91,35 kN, dengan kata lain gaya tekan tidak perlu memenuhi syarat tulangan transversal/pengekang untuk komponen tekan.



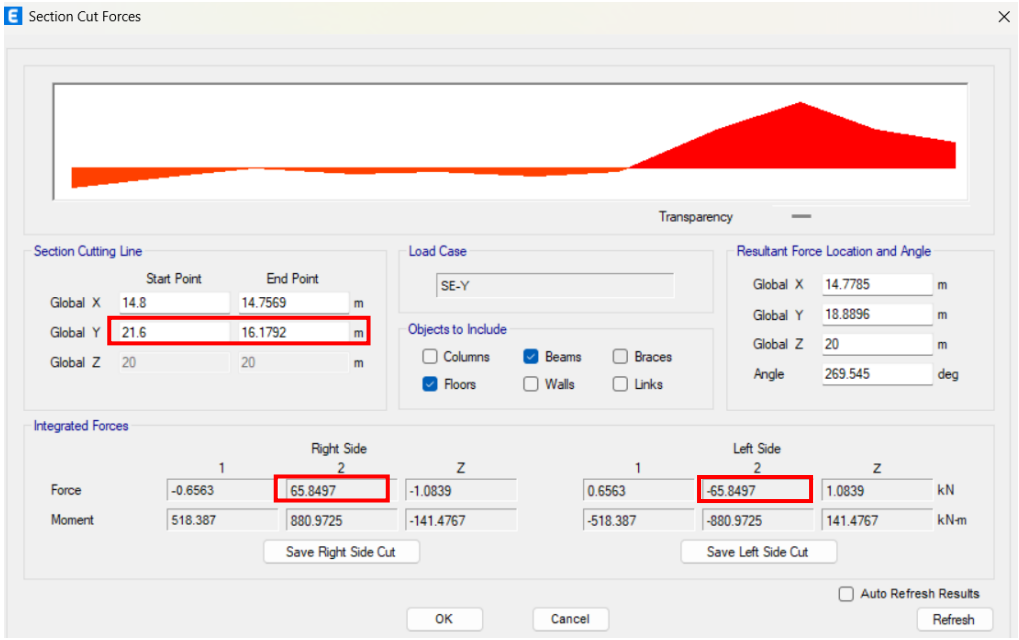
Gambar 4.54 Detail Pemasangan Tulangan Kord

12. Penentuan Tulangan Kolektor

Tulangan kolektor dalam SNI 1726:2019 merujuk pada elemen tulangan tambahan pada diafragma yang dirancang untuk mengumpulkan dan mentransfer gaya geser dari elemen nonstruktural atau bagian diafragma ke elemen penahan gaya lateral vertikal, seperti kolom atau dinding geser, selama kejadian gempa. Fungsi utama kolektor adalah memastikan distribusi gaya yang merata, mencegah konsentrasi tegangan yang dapat menyebabkan kegagalan lokal pada sambungan atau diafragma itu sendiri. Ketentuan ini khususnya relevan pada struktur dengan bukaan besar, ketidakberaturan horizontal, atau diafragma fleksibel, di mana gaya perlu dialihkan secara efisien ke sistem penahan utama, meningkatkan ketahanan keseluruhan terhadap guncangan seismik.

Tulangan kolektor ditempatkan di sepanjang jalur yang mengarah ke elemen penahan vertikal, sering kali berupa tulangan tambahan yang diperkuat dengan pengangkutan yang memadai untuk mencegah slip atau *pull-out*. Jarak dan diameter tulangan harus disesuaikan dengan panjang efektif diafragma dan gaya yang ditransfer, dengan detailing yang mencakup sengkang pendamping untuk pengekangan tambahan. Ketentuan ini diintegrasikan dengan analisis efek P-Delta dan eksentrisitas untuk memastikan bahwa kolektor dapat menahan beban siklik tanpa deformasi berlebih, terutama pada struktur tinggi atau tidak simetris.

Cara yang serupa dapat diterapkan untuk menentukan tulangan kolektor, hanya saja sewaktu *draw section cut* harus di dekat elemen vertikal. Di bawah ini adalah hasil *section cut* untuk tulangan kolektor.



Gambar 4.55 *Section Cut Forces* untuk Tulangan Kolektor

Gaya tarik yang terjadi adalah 65,85 kN, maka As = Tu* Ω0/(Ø*fy) = 65.850*2,5 N/(0,9*420) = 762,16 mm2. Dari hasil As perlu tersebut akan dipasang 10 buah tulangan D10 mm. Untuk mengetahui batas izin tekan yang terjadi, bisa dilihat di Pasal 18.12.7.5 SNI 2847:2019. Diketahui bahwa batas izin tekan adalah 0,2*fc*Apelat = 0,2*30*(21,6,-16,18)*1000*125 = 4.065 kN. Jika dibandingkan gaya tekan yang terjadi yaitu sebesar 65,85 kN*2,5 = 164,63 kN dengan kata lain gaya tekan tidak perlu memenuhi syarat tulangan transversal/pengekang untuk komponen tekan.

13. Faktor Redundansi

Faktor redundansi dalam SNI 1726:2019 merupakan faktor pengali yang digunakan untuk memperhitungkan tingkat redundansi atau keberulangan sistem struktural dalam mendistribusikan gaya seismik, sehingga mencegah kegagalan total jika salah satu elemen struktural mengalami kerusakan. Faktor ini, dilambangkan dengan ρ, bertujuan untuk meningkatkan keamanan struktur pada kategori desain seismik yang lebih tinggi, seperti D, E, atau F, dengan memastikan bahwa desain memperhitungkan potensi kehilangan elemen penahan gaya tanpa menyebabkan kegagalan progresif. Secara umum, faktor redundansi memengaruhi perhitungan gaya internal akibat beban gempa, di mana nilai yang lebih tinggi diterapkan pada struktur dengan redundansi rendah untuk mengompensasi risiko yang lebih besar selama kejadian gempa

Penentuan nilai faktor redundansi bergantung pada konfigurasi struktur dan apakah memenuhi persyaratan tertentu untuk dianggap memiliki redundansi yang memadai. Menurut ketentuan, nilai ρ diambil sebagai 1,0 jika struktur memenuhi syarat seperti memiliki setidaknya dua bay portal penahan gaya pada perimeter untuk setiap arah gempa dan tidak memiliki ketidakberaturan horizontal yang signifikan, terutama pada tingkat yang menahan lebih dari 35% geser dasar. Namun, jika syarat tersebut tidak terpenuhi, nilai ρ ditingkatkan menjadi 1,3, yang secara efektif meningkatkan gaya geser seismik horizontal hingga 30% untuk memastikan margin keamanan yang lebih besar. Evaluasi ini dilakukan melalui analisis struktural, termasuk pelepasan sementara elemen kritis untuk memverifikasi kapasitas sisa.

Berikut ini adalah kondisi di mana nilai ρ harus diambil sebesar 1 dan 1,3:

a. Jika ρ diambil sebesar 1

- Desain struktur untuk kategori desain seismik B atau C;
- Perhitungan simpangan antar tingkat dan pengaruh P-delta;
- Desain komponen nonstruktural;
- Desain struktur nongedung yang tidak mirip dengan bangunan gedung;

- Desain elemen kolektor, sambungan lewatan, dan sambungan, yang memperhitungkan kombinasi pengaruh beban seismik termasuk faktor kuat lebih berdasarkan Pasal 7.4.3;
- Beban diafragma yang ditentukan menggunakan Persamaan (51), termasuk batasan yang disyaratkan oleh Persamaan (52) dan Persamaan (53);
- Desain struktur dengan sistem peredam sesuai Pasal 13 dan
- Desain dinding struktural terhadap gaya keluar bidang, termasuk sistem angkurnya.

b. Jika ρ diambil sebesar 1,3

- Masing-masing tingkat yang menahan lebih dari 35 % geser dasar dalam arah yang ditinjau harus sesuai dengan Tabel 15 dan
- Struktur dengan denah beraturan di semua tingkat dengan sistem pemikul gaya seismik terdiri dari paling sedikit dua bentang perimeter pemikul gaya seismik yang merangka pada masing-masing sisi struktur dalam masing-masing arah ortogonal di setiap tingkat yang menahan lebih dari 35 % geser dasar. Jumlah bentang untuk dinding geser harus dihitung sebagai panjang dinding geser dibagi dengan tinggi tingkat atau dua kali panjang dinding geser dibagi dengan tinggi tingkat, hsx, untuk konstruksi rangka ringan..

14. Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan dalam SNI 1727:2020 menetapkan persyaratan minimum untuk menggabungkan berbagai jenis beban seperti beban mati (D), beban hidup (L), beban angin (W), dan beban gempa (E) dalam perencanaan bangunan gedung dan struktur lain. Standar ini membedakan antara metode desain kekuatan (*load and resistance factor design*) dan metode tegangan izin (*allowable stress design*), dengan tujuan memastikan struktur memiliki kekuatan dan stabilitas yang memadai terhadap beban ekstrem. Untuk metode desain kekuatan, kombinasi dasar mencakup 1,4D untuk beban mati saja, dan 1,2D + 1,6L + 0,5 (Lr atau S atau R) untuk kombinasi dengan beban hidup dan beban atap. Pendekatan ini memperhitungkan faktor ketidakpastian dalam beban untuk mencapai keandalan target.

Kombinasi pembebanan juga memperhitungkan persyaratan kemampuan layan, seperti lendutan dan getaran, dengan kombinasi nonterfaktor seperti D + L untuk evaluasi deformasi. Standar ini mengadopsi prinsip dari ASCE 7-16 dengan modifikasi untuk kondisi Indonesia, menghilangkan beban salju dan es, serta merujuk beban gempa ke SNI 1726:2019. Tujuannya adalah mencapai keandalan struktural yang tinggi, dengan penekanan pada kategori risiko bangunan untuk penentuan faktor beban tambahan.

Kombinasi pembebanan dalam SNI 1726:2019 dirancang untuk memastikan struktur bangunan gedung dan nongedung mampu menahan efek beban gempa secara aman, dengan mengintegrasikan beban seismik (E) ke dalam kombinasi beban keseluruhan. Beban seismik E dibagi menjadi efek horizontal (Eh) dan vertikal (Ev), di mana Eh mencakup gaya lateral dari guncangan gempa, sementara Ev mewakili komponen vertikal yang dapat memperbesar atau mengurangi beban gravitasi. Faktor redundansi (ρ) diterapkan pada efek beban gempa horizontal untuk memperhitungkan tingkat redundansi sistem struktural, dengan nilai ρ = 1,0 untuk struktur dengan redundansi tinggi dan ρ = 1,3 untuk redundansi rendah. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan struktur terhadap kegagalan progresif selama kejadian gempa.

Dalam metode desain kekuatan (*strength design*), kombinasi pembebanan yang mencakup beban gempa melibatkan persamaan seperti (1,2 + 0,2 S_DS) D + ρ Q_E + L, di mana D adalah beban mati, S_DS adalah akselerasi desain spektral jangka pendek, Q_E adalah efek beban gempa, dan L adalah beban hidup. Kombinasi lain termasuk (0,9 - 0,2 S_DS) D + ρ Q_E untuk kasus di mana beban gempa mengurangi efek gravitasi. Efek vertikal Ev dihitung sebagai 0,2 S_DS D, yang ditambahkan atau dikurangkan tergantung arahnya, sementara Eh diambil sebagai ρ Q_E. Ketentuan ini memastikan bahwa desain memperhitungkan interaksi antara beban gravitasi dan seismik, dengan penekanan pada kategori desain seismik yang lebih tinggi seperti D, E, atau F.

Untuk metode tegangan izin (*allowable stress design*), kombinasi pembebanan disesuaikan dengan faktor lebih rendah, seperti (1,0 + 0,14 S_DS) D + 0,7 ρ Q_E + L, atau (0,6 - 0,14 S_DS)D + 0,7 ρ Q_E. Pendekatan ini memungkinkan penggunaan tegangan izin material tanpa melebihi batas elastis, dengan penyesuaian untuk beban sementara seperti angin atau banjir jika relevan. SNI 1726:2019 menekankan bahwa kombinasi ini harus digunakan bersama dengan SNI 1727:2020 untuk beban nonseismik, memastikan konsistensi dalam perencanaan keseluruhan struktur. Evaluasi kombinasi juga mencakup pertimbangan *overstrength* faktor (Ω0) untuk elemen kritis dalam sistem seismik.

a. Metode *Load Resistance Factor Design* (LRFD)

- 1.4D
- 1.2D + 1.6L + 0.5 (Lr atau S atau R)
- 1.2D + 1.6 (Lr atau S atau R) + (L atau 0.5W)
- 1.2D + 1W + L + 0.5 (Lr atau S atau R)
- 0.9D + 1W
- 1.2D + Ev + Eh + L + 0.2S
- 0.9D – Ev + Eh

b. Metode *Allowable Stress Design* (ASD)

- D
- D + L
- D + (Lr atau S atau R)
- D + 0.75L + 0.75 (Lr atau S atau R)
- D + 0.6W
- D + 0.75L + 0.75 (0.6W) + 0.75 (Lr atau S atau R)
- 0.6 D + 0.6W
- 1D + 0.7Ev + 0.7Eh
- 1D + 0.525Ev + 0.525Eh + 0.75L + 0.75S
- 0.6D – 0.7Ev + 0.7Eh

BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK

BAB 5

BENTUK ALAMI GETARAN

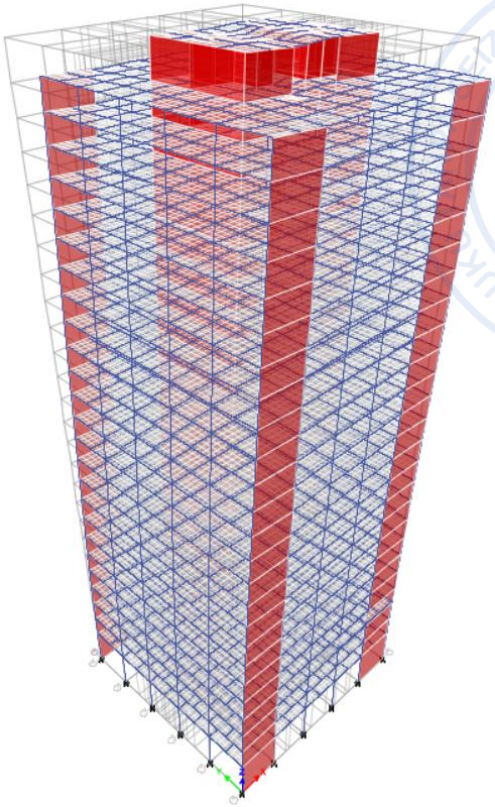
A. Bentuk Getar Alami (*Mode Shape*)

Mode shape dalam SNI 1726:2019 merujuk pada pengaruh bentuk getar alami (*mode shape*) struktur terhadap respons dinamis selama gempa, yang menjadi dasar dalam analisis spektrum respons modal untuk mengevaluasi distribusi gaya lateral dan deformasi. *Mode shape* menggambarkan pola deformasi struktur pada setiap ragam getar, di mana mode pertama biasanya mendominasi translasi pada struktur rendah, sementara *mode higher* (seperti mode kedua atau ketiga) memberikan kontribusi signifikan pada struktur tinggi atau tidak beraturan, menyebabkan amplifikasi geser dan momen di tingkat atas. Efek ini memastikan bahwa analisis memperhitungkan interaksi antar mode, menghindari asumsi sederhana dari metode statik yang mungkin mengabaikan efek *mode higher*, sehingga meningkatkan akurasi prediksi kegagalan lokal.

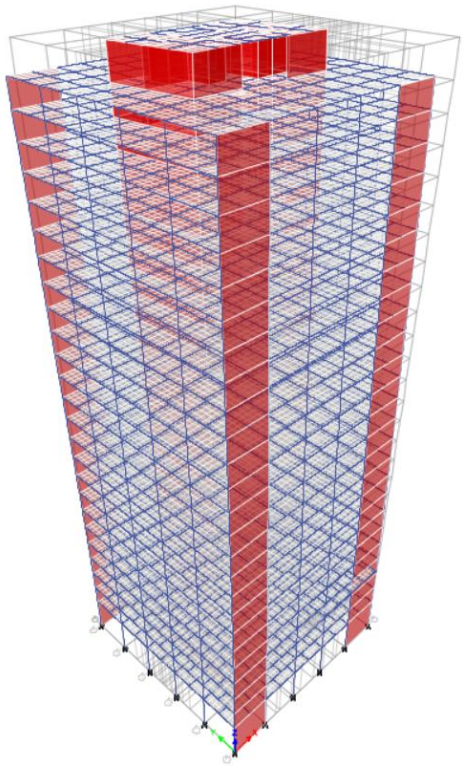
Penentuan *mode shape* melibatkan perhitungan faktor partisipasi massa efektif untuk setiap mode, di mana jumlah ragam getar harus mencakup minimal 90% massa struktur untuk arah horizontal dan vertikal. Jika mode-mode memiliki periode yang berdekatan, kombinasi respons dilakukan menggunakan metode *Complete Quadratic Combination* (CQC) untuk memperhitungkan korelasi antar mode, sementara metode *Square Root of the Sum of Squares* (SRSS) digunakan untuk mode yang terpisah. Efek ini juga memengaruhi penskalaan gaya geser dasar dinamik agar tidak kurang dari nilai statik ekuivalen, memastikan margin keamanan terhadap respons nonlinier akibat gempa.

Implikasi *mode shape* dalam desain adalah peningkatan ketahanan struktur terhadap deformasi berlebih, terutama pada kategori desain seismik tinggi, dengan persyaratan pemodelan 3D untuk menangkap efek torsi dari *mode shape* yang tidak simetris. Ketentuan ini bertujuan untuk mencegah kegagalan progresif dengan mempertimbangkan kontribusi penuh dari semua mode relevan.

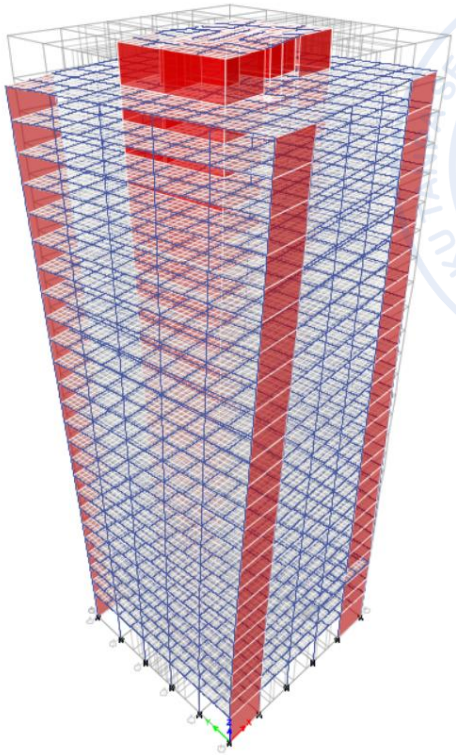
Untuk melihat animasi defleksi arah X dan Y pada ETABS, adalah dengan mengembalikan tampilan menjadi 3 dimensi lalu klik F6 → *Mode* → *Modal Number Mode* 1 → OK.



Gambar 5.1 *Mode Shape* 1 (arah X atau UX)



Gambar 5.2 *Mode Shape* 2 (arah Y atau UY)

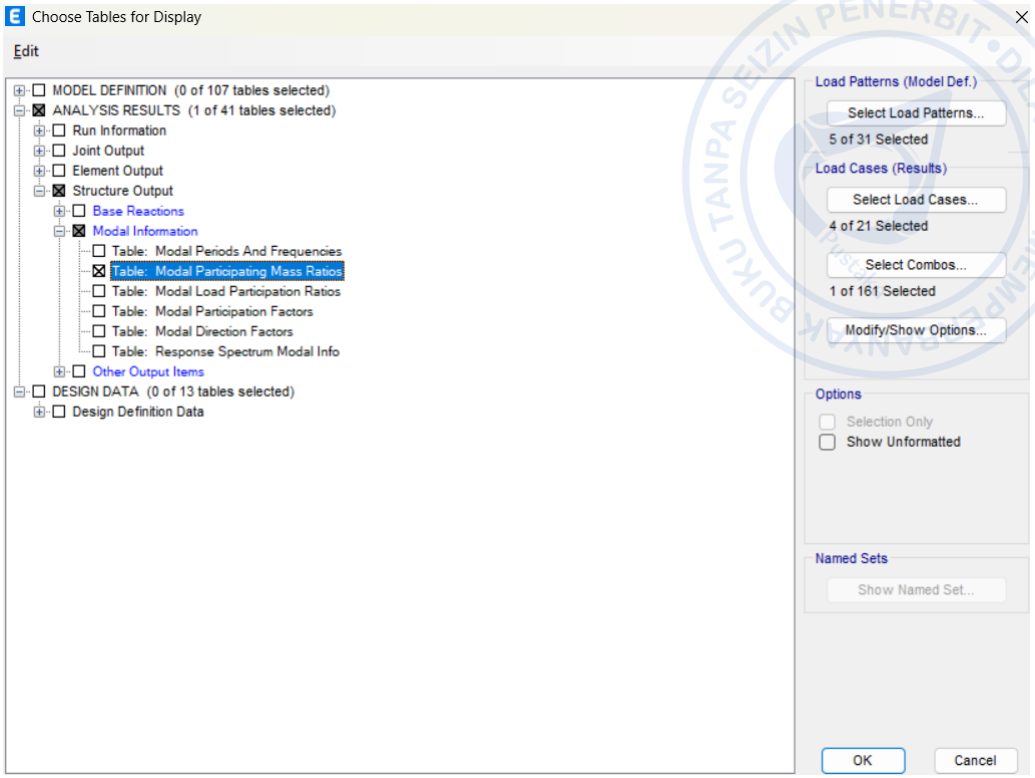


Gambar 5.3 *Mode Shape* 3 (arah Z atau UZ)

B. Partisipasi Massa

Dikatakan di SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1 partisipasi massa dalam merujuk pada proporsi massa struktur yang berkontribusi terhadap respons dinamis pada setiap ragam getar alami selama analisis spektrum respons modal. Konsep ini penting untuk memastikan bahwa analisis dinamis secara akurat merepresentasikan perilaku struktur terhadap beban gempa, dengan mempertimbangkan distribusi massa secara tiga dimensi. Partisipasi massa dihitung untuk setiap arah utama (X, Y, dan vertikal), dan jumlah ragam getar yang dianalisis harus mencakup minimal 90% massa partisipasi efektif untuk arah horizontal serta 100% untuk arah vertikal, guna menghindari *underestimation* gaya lateral atau vertikal yang signifikan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih realistis, terutama pada struktur tinggi atau tidak beraturan yang memiliki mode getar kompleks.

Pada umumnya, nilai maksimum dari modal pada *software* ETABS adalah 12. Akan tetapi, itu bisa disesuaikan jika partisipasi massa kurang dari 90% pada modal ke 12. Untuk mengetahui berapa persen partisipasi massa dari gedung kantor ini, caranya adalah klik CTRL+T → *Analysis Results* → *Structure Output* → *Modal Information* → *Table: Modal Participating Mass Ratios* → *OK*.



Gambar 5.4 *Choose Table for Display*

Tabel 5.1

Modal Participating Mass Ratios

Modal Participating Mass Ratios

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None

Filter: None

Modal Participating Mass Ratios

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Modal	1	3.353	0.6544	0.0022	0	0.6544	0.0022	0	0.0012	0.379	1.75E-05	0.0012	0.379	1.75E-05
Modal	2	3.069	0.0021	0.6603	0	0.6565	0.6625	0	0.3731	0.0013	4.405E-06	0.3743	0.3803	2.19E-05
Modal	3	2.011	6.182E-06	1.567E-06	0	0.6565	0.6625	0	0	2.729E-06	0.692	0.3743	0.3803	0.692
Modal	4	0.751	0.1748	0.0023	0	0.8313	0.6648	0	0.0038	0.2526	2.792E-06	0.3781	0.6329	0.6921
Modal	5	0.683	0.0027	0.1814	0	0.8339	0.8462	0	0.2724	0.0036	1.391E-06	0.6505	0.6365	0.6921
Modal	6	0.534	7.015E-06	2.209E-06	0	0.8339	0.8462	0	3.685E-06	1.159E-05	0.1513	0.6506	0.6365	0.8434
Modal	7	0.308	0.0676	0.0006	0	0.9015	0.8468	0	0.0011	0.1199	0	0.6517	0.7564	0.8434
Modal	8	0.285	0.0006	0.0676	0	0.9021	0.9145	0	0.129	0.0011	0	0.7807	0.7575	0.8434
Modal	9	0.243	5.852E-06	7.524E-07	0	0.9021	0.9145	0	1.774E-06	1.269E-05	0.0655	0.7807	0.7575	0.9088
Modal	10	0.172	0.0361	3.84E-05	0	0.9382	0.9145	0	0.0001	0.0813	8.17E-07	0.7808	0.8388	0.9088
Modal	11	0.164	2.066E-05	0.0336	0	0.9382	0.9481	0	0.0797	0.0001	5.628E-07	0.8605	0.8388	0.9088
Modal	12	0.143	3.007E-06	0	0	0.9382	0.9481	0	0	7.866E-06	0.0356	0.8605	0.8388	0.9445

BANYAK BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT MELANGGAR HAK CIPTA

Dapat dilihat di bagian SumUX dan SumUY, *modal participating mass ratios* pada modal ke 12 sudah melebihi 90% dengan modal ke 1 (UX) dan ke 2 (UY) adalah defleksi arah X dan Y, bukan Z. Dengan kata lain, partisipasi massa pada struktur gedung yang kita rancang sudah memenuhi syarat.

BUKU TANPA IZIN PENERBIT DILARANG MEMPERBANYAK
Pustaka

BAB 6

PERHITUNGAN GAYA GEMPA

A. Pusat Massa dan Pusat Kekakuan

Pusat massa dalam SNI 1726:2019 merujuk pada titik di mana total massa struktur pada suatu tingkat atau diafragma dapat dianggap terkonsentrasi, sehingga menjadi acuan untuk menentukan gaya inersia yang dihasilkan selama gempa. Konsep ini penting dalam analisis seismik karena eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan dapat memicu momen torsi tambahan, yang meningkatkan risiko deformasi tidak seragam dan kegagalan elemen struktural. Pusat massa dihitung berdasarkan distribusi berat efektif lantai, termasuk beban mati, sebagian beban hidup, dan massa elemen nonstruktural, dengan mempertimbangkan variasi massa antar tingkat untuk memastikan akurasi respons dinamis struktur.

Penentuan pusat massa melibatkan perhitungan koordinat massa untuk setiap tingkat berdasarkan posisi dan magnitudo berat, yang biasanya dilakukan melalui pemodelan tiga dimensi untuk struktur kompleks. Eksentrisitas tak terduga, minimal 5% dari dimensi rencana, ditambahkan untuk memperhitungkan ketidakpastian dalam distribusi massa atau kekakuan, terutama pada bangunan dengan ketidakberaturan horizontal seperti bentuk L atau T. Ketentuan ini memastikan bahwa analisis mempertimbangkan efek torsio bawaan dan tak terduga, dengan penskalaan gaya geser dasar yang disesuaikan jika analisis dinamis digunakan, guna menghindari *underestimation* beban pada sambungan atau elemen penahan gaya lateral.

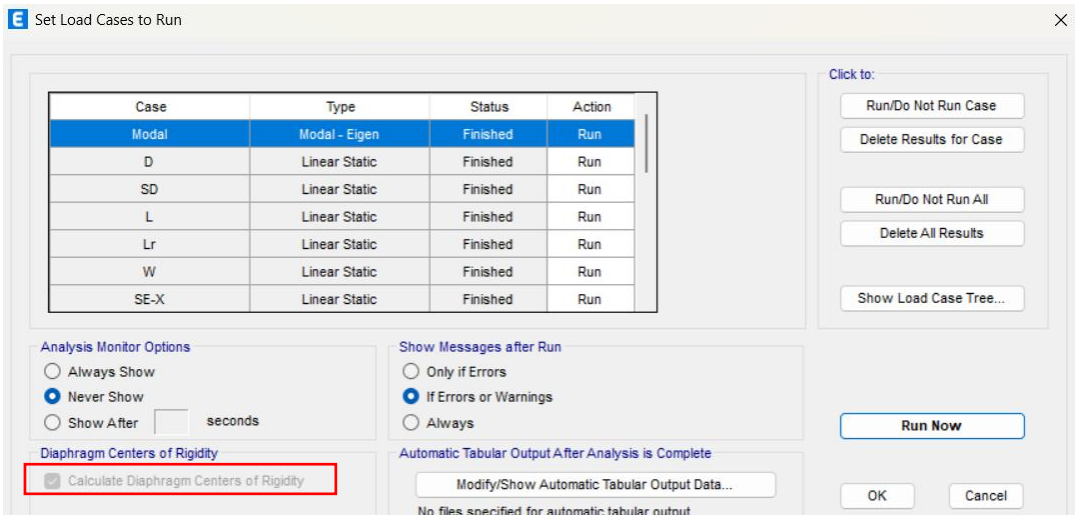
Pusat kekakuan dalam SNI 1726:2019 merujuk pada titik konsentrasi kekakuan lateral struktur pada suatu tingkat atau diafragma, di mana penerapan gaya lateral tidak menghasilkan rotasi atau torsi netral. Konsep ini penting untuk menganalisis eksentrisitas antara pusat kekakuan dan pusat massa, yang dapat menyebabkan momen torsi tambahan selama gempa, sehingga meningkatkan risiko deformasi tidak merata pada elemen struktural. Pusat kekakuan dihitung berdasarkan distribusi kekakuan elemen vertikal seperti dinding geser, rangka, atau *bracing*, dan digunakan untuk mengevaluasi ketidakberaturan horizontal seperti tipe torsi, memastikan desain struktur memperhitungkan distribusi gaya seismik yang akurat.

Aplikasi pusat kekakuan meliputi perhitungan perpindahan maksimum pada sistem isolasi seismik, di mana eksentrisitas sesungguhnya dan tak terduga (minimal

5% dimensi rencana) diintegrasikan untuk menentukan defleksi total. Pada struktur dengan diafragma kaku, pusat kekakuan memengaruhi distribusi gaya geser horizontal dan momen torsi bawaan, sementara pada struktur nonbangunan, kriteria jarak minimal 5% dari pusat massa digunakan untuk mengecualikan analisis torsi tak terduga. Perhitungan ini sering dilakukan melalui pemodelan komputer, dengan mempertimbangkan kekakuan *in-plane diafragma* dan elemen vertikal untuk menghindari *underestimation* beban pada sambungan kritis.

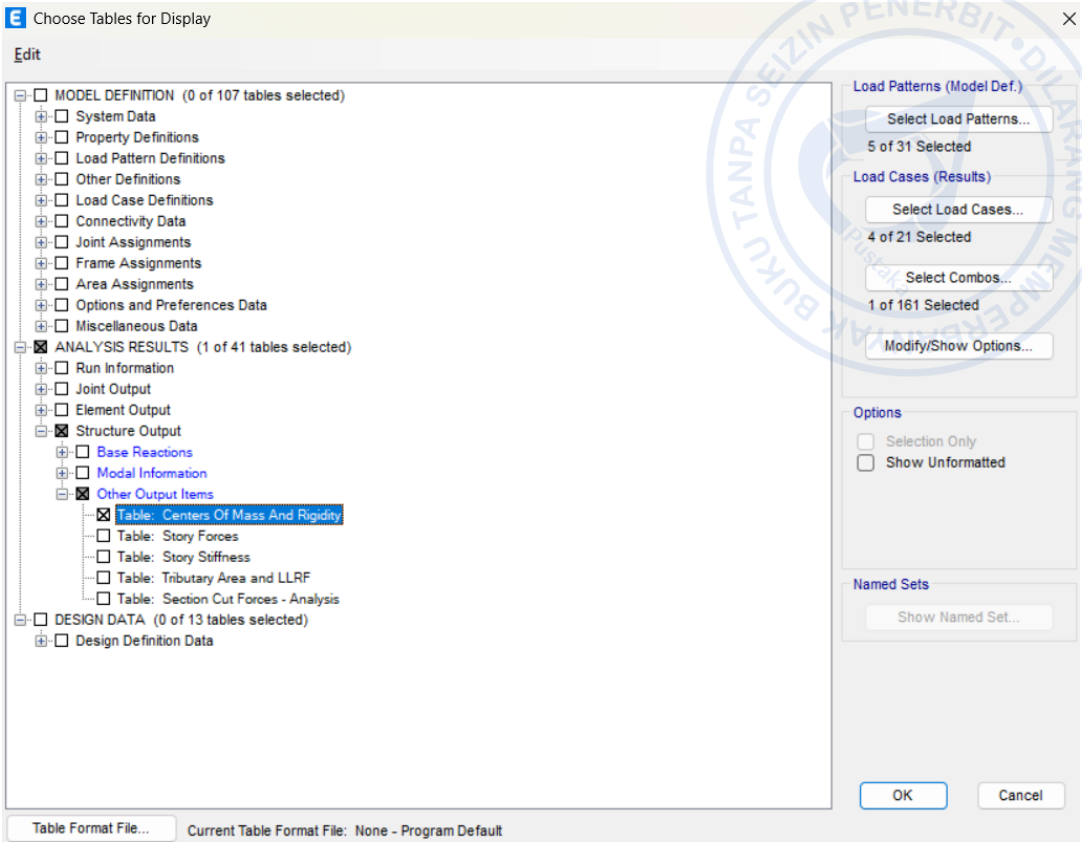
Implikasi pusat kekakuan dalam desain seismik adalah peningkatan ketahanan struktur terhadap kegagalan lokal, terutama pada kategori desain seismik tinggi, dengan persyaratan analisis dinamis jika eksentrisitas signifikan. Ketentuan ini bertujuan untuk mencegah kerusakan progresif dengan memastikan keseimbangan kekakuan vertikal dan horizontal, sehingga struktur tetap stabil selama guncangan.

Sebelum *running model* yang telah dibuat, ada baiknya untuk menceklis nilai pusat kekakuan (*Center of Rigidity*) pada *software* ETABS. Caranya adalah klik menu *Analyze → Set Load Cases to Run →* centang bagian *Diaphragm Centers of Rigidity → Run Now*.



Gambar 6.1 *Set Load Cases to Run*

Untuk mengetahui nilai pusat massa dan pusat kekakuan pada *software* ETABS adalah dengan klik CTRL+T → *Analysis Results → Structure Output → Other Output Items → Table: Center of Mass and Rigidity → OK*.



Gambar 6.2 *Choose Table for Display*

Tabel 6.1

Center of Mass and Rigidity

Centers Of Mass And Rigidity

File Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Hidden Columns: No Sort: None
Filter: None

Story	Diaphragm	Mass X ton	Mass Y ton	XCM m	YCM m	Cum Mass X ton	Cum Mass Y ton	XCCM m	YCCM m	XCR m	YCR m
LT. ATAP (EL ...	D1	468.3683	468.3683	19.9936	19.9689	468.3683	468.3683	19.9936	19.9689	20.0178	19.9061
LT. 26 (EL +10...	D1	1336.1556	1336.1556	19.9779	19.9895	1804.5239	1804.5239	19.982	19.9842	20.0178	19.9065
LT. 25 (EL 104...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	3226.7871	3226.7871	19.9896	19.9839	20.0179	19.9066
LT. 24 (EL +99...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	4649.0504	4649.0504	19.9925	19.9838	20.018	19.9066
LT. 23 (EL +95...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	6071.3136	6071.3136	19.9941	19.9837	20.0181	19.9067
LT. 22 (EL +91...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	7493.5768	7493.5768	19.9951	19.9837	20.0183	19.9067
LT. 21 (EL +87...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	8915.8401	8915.8401	19.9957	19.9836	20.0185	19.9067
LT. 20 (EL +83...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	10338.1033	10338.1033	19.9962	19.9836	20.0187	19.9067
LT. 19 (EL +78...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	11760.3666	11760.3666	19.9966	19.9836	20.0189	19.9068
LT. 18 (EL +74...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	13182.6298	13182.6298	19.9969	19.9836	20.0191	19.9069
LT. 17 (EL +70...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	14604.8931	14604.8931	19.9971	19.9836	20.0193	19.907
LT. 16 (EL 66....	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	16027.1563	16027.1563	19.9973	19.9836	20.0194	19.9072
LT. 15 (EL +62...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	17449.4195	17449.4195	19.9974	19.9836	20.0194	19.9076
LT. 14 (EL +57...	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	18871.6828	18871.6828	19.9976	19.9836	20.0194	19.9081
LT. 13 (EL +53...	D1	1428.3139	1428.3139	19.9992	19.9836	20299.9967	20299.9967	19.9977	19.9836	20.0192	19.9088
LT. 12 (EL 49....	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	21735.4317	21735.4317	19.9978	19.9836	20.019	19.9097
LT. 11 (EL +45...	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	23170.8668	23170.8668	19.9979	19.9836	20.0185	19.911
LT. 10 (EL +41...	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	24606.3019	24606.3019	19.998	19.9836	20.0179	19.9127
LT. 9 (EL +36....	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	26041.7369	26041.7369	19.998	19.9836	20.017	19.9148
LT. 8 (EL 32.60)	D1	1474.7411	1474.7411	19.9992	19.9841	27516.478	27516.478	19.9981	19.9836	20.0159	19.9177
LT. 7 (EL 28.40)	D1	1518.9341	1518.9341	19.9993	19.9845	29035.4121	29035.4121	19.9982	19.9837	20.0144	19.9215
LT. 6 (EL +24....	D1	1518.9341	1518.9341	19.9993	19.9845	30554.3462	30554.3462	19.9982	19.9837	20.0124	19.9268
LT. 5 (EL +20....	D1	1526.4705	1526.4705	20.0516	19.907	32080.8167	32080.8167	20.0007	19.98	20.0098	19.9333
LT. 4 (EL +15....	D1	1563.2183	1563.2183	20.3003	19.2597	33644.035	33644.035	20.0147	19.9466	20.0058	19.9477
LT. 3 (EL +11....	D1	1969.1724	1969.1724	20.0547	19.7015	35613.2075	35613.2075	20.0169	19.933	20.001	19.9626
LT. 2 (EL +7.40)	D1	2573.8282	2573.8282	20.0415	19.8149	38187.0356	38187.0356	20.0185	19.9251	19.9969	19.9715

Lalu setelah itu, kita menyalin data pada tabel ETABS tersebut ke *sheet* Excel yang telah dibuat seperti di tunjukkan pada tabel di bawah.

Tabel 6.2

Summary Center of Mass and Rigidity

Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y	XCM	YCM	Cumulative X	Cumulative Y	XCCM	YCCM	XCR	YCR	Selisih		Keterangan
		ton-s²/m	ton-s²/m	m	m	ton-s²/m	ton-s²/m	m	m	m	m	X	Y	
Dak	D1	468.3683	468.3683	19.9936	19.9689	468.3683	468.3683	19.9936	19.9689	20.0178	19.9061	0.0242	0.0628	BERHIMPITAN
26	D1	1336.1556	1336.1556	19.9779	19.9895	1804.5239	1804.5239	19.9820	19.9842	20.0178	19.9065	0.0358	0.0777	BERHIMPITAN
25	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	3226.7871	3226.7871	19.9896	19.9839	20.0179	19.9066	0.0283	0.0773	BERHIMPITAN
24	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	4649.0504	4649.0504	19.9925	19.9838	20.0180	19.9066	0.0255	0.0772	BERHIMPITAN
23	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	6071.3136	6071.3136	19.9941	19.9837	20.0181	19.9067	0.0240	0.0770	BERHIMPITAN
22	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	7493.5768	7493.5768	19.9951	19.9837	20.0183	19.9067	0.0232	0.0770	BERHIMPITAN
21	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	8915.8401	8915.8401	19.9957	19.9836	20.0185	19.9067	0.0228	0.0769	BERHIMPITAN
20	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	10338.1033	10338.1033	19.9962	19.9836	20.0187	19.9067	0.0225	0.0769	BERHIMPITAN
19	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	11760.3666	11760.3666	19.9966	19.9836	20.0189	19.9068	0.0223	0.0768	BERHIMPITAN
18	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	13182.6298	13182.6298	19.9969	19.9836	20.0191	19.9069	0.0222	0.0767	BERHIMPITAN
17	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	14604.8931	14604.8931	19.9971	19.9836	20.0193	19.9070	0.0222	0.0766	BERHIMPITAN
16	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	16027.1563	16027.1563	19.9973	19.9836	20.0194	19.9072	0.0221	0.0764	BERHIMPITAN
15	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	17449.4195	17449.4195	19.9974	19.9836	20.0194	19.9076	0.0220	0.0760	BERHIMPITAN
14	D1	1422.2632	1422.2632	19.9992	19.9835	18871.6828	18871.6828	19.9976	19.9836	20.0194	19.9081	0.0218	0.0755	BERHIMPITAN
13	D1	1428.3139	1428.3139	19.9992	19.9836	20299.9967	20299.9967	19.9977	19.9836	20.0192	19.9088	0.0215	0.0748	BERHIMPITAN
12	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	21735.4317	21735.4317	19.9978	19.9836	20.0190	19.9097	0.0212	0.0739	BERHIMPITAN
11	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	23170.8668	23170.8668	19.9979	19.9836	20.0185	19.9110	0.0206	0.0726	BERHIMPITAN
10	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	24606.3019	24606.3019	19.9980	19.9836	20.0179	19.9127	0.0199	0.0709	BERHIMPITAN
9	D1	1435.4351	1435.4351	19.9992	19.9836	26041.7369	26041.7369	19.9980	19.9836	20.0170	19.9148	0.0190	0.0688	BERHIMPITAN
8	D1	1474.7411	1474.7411	19.9992	19.9841	27516.4780	27516.4780	19.9981	19.9836	20.0159	19.9177	0.0178	0.0659	BERHIMPITAN
7	D1	1518.9341	1518.9341	19.9993	19.9845	29035.4121	29035.4121	19.9982	19.9837	20.0144	19.9215	0.0162	0.0622	BERHIMPITAN
6	D1	1518.9341	1518.9341	19.9993	19.9845	30554.3462	30554.3462	19.9982	19.9837	20.0124	19.9268	0.0142	0.0569	BERHIMPITAN
5	D1	1526.4705	1526.4705	20.0516	19.9070	32080.8167	32080.8167	20.0007	19.9800	20.0098	19.9333	0.0091	0.0467	BERHIMPITAN
4	D1	1563.2183	1563.2183	20.3003	19.2597	33644.0350	33644.0350	20.0147	19.9466	20.0058	19.9477	0.0089	0.0011	BERHIMPITAN
3	D1	1969.1724	1969.1724	20.0547	19.7015	35613.2075	35613.2075	20.0169	19.9330	20.0010	19.9626	0.0159	0.0296	BERHIMPITAN
2	D1	2573.8282	2573.8282	20.0415	19.8149	38187.0356	38187.0356	20.0185	19.9251	19.9969	19.9715	0.0216	0.0464	BERHIMPITAN

Berdasarkan tabel di atas, diketahui bahwa pusat massa dan pusat kekakuan jaraknya berhimpitan, sehingga meminimalkan efek torsi.

B. Perhitungan Pembesaran Momen Torsi tak Terduga

Torsi tak terduga sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019, merujuk pada momen puntir tambahan yang diperhitungkan dalam desain seismik untuk mengakomodasi ketidakpastian atau ketidaksempurnaan dalam distribusi massa dan kekakuan struktur bangunan. Torsi ini timbul akibat eksentrisitas tak sengaja (*accidental eccentricity*), yang diasumsikan terjadi meskipun struktur dirancang dengan pusat massa dan pusat kekakuan yang sejajar. Ketentuan ini penting untuk memastikan bahwa bangunan tetap aman terhadap efek puntiran yang tidak terantisipasi selama gempa, terutama pada bangunan dengan denah tidak beraturan atau kompleks dan harus memenuhi Tabel 13 SNI 1726:2019.

Jika diafragma tidak fleksibel, desain harus menyertakan momen torsi bawaan (Mt) yang dihasilkan dari lokasi massa struktur ditambah momen torsi tak terduga (Mta) akibat perpindahan pusat massa dari lokasi aktualnya yang diasumsikan pada masing-masing arah dengan jarak sebesar 5% dimensi struktur tegak lurus terhadap arah gaya yang diterapkan.

Dilihat dari Pasal 7.8.4.3 di sana dikatakan bahwa struktur yang didesain untuk kategori desain seismik C, D, E, atau F, di mana ketidakberaturan torsi tipe 1a atau 1b terjadi seperti didefinisikan dalam Tabel 13 harus mempunyai pengaruh yang diperhitungkan dengan mengalikan Mta di masing-masing tingkat dengan faktor pembesaran torsi (Ax) ditentukan dari persamaan di bawah.

$$A_x = \left(\frac{\delta_{max}}{1{,}2\delta_{avg}}\right)^2$$

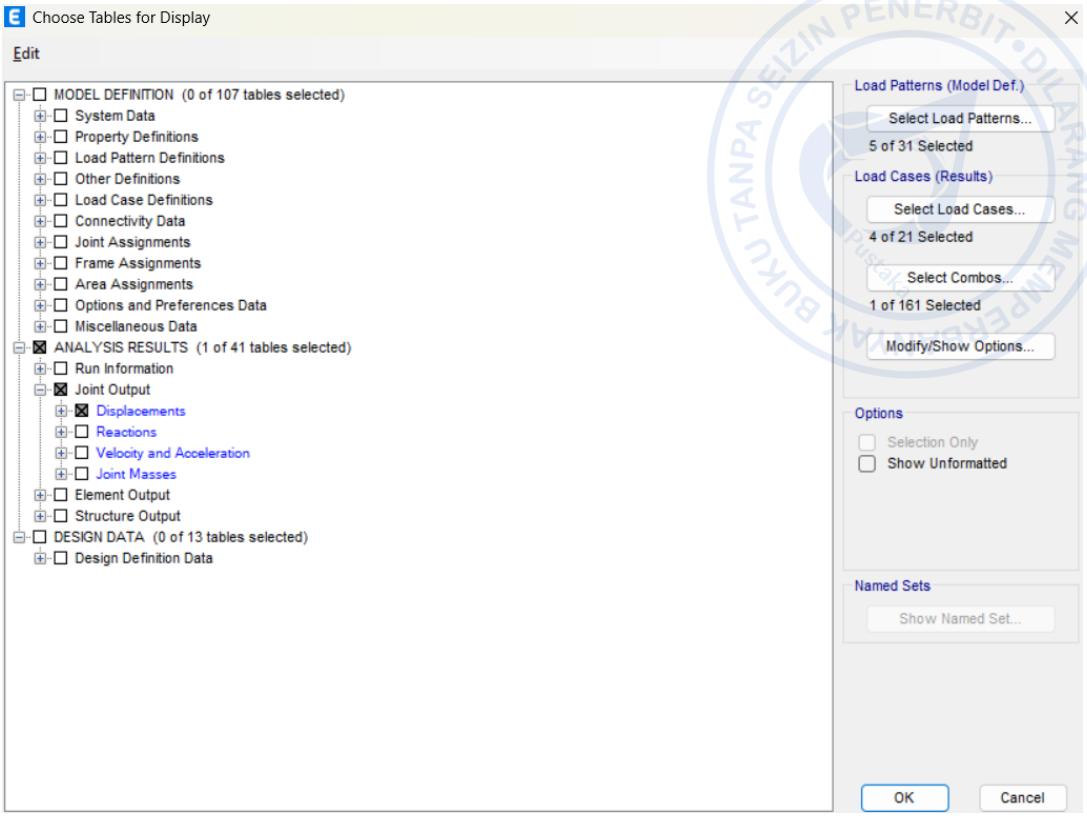
Keterangan :

δ_{max} adalah perpindahan maksimum di tingkat x (mm) yang dihitung dengan mengasumsikan $A_x = 1$ (mm)

δ_{avg} adalah rata-rata perpindahan di titik-titik terjauh struktur di tingkat x yang dihitung dengan mengasumsikan $A_x = 1$ (mm)

Dan jika kita lihat pada ketidakberaturan horizontal pada struktur gedung kantor yang didesain ini, disimpulkan bahwa gedung kantor ini **TIDAK MEMILIKI KETIDAKBERATURAN TORSI 1a DAN 1b**. Maka dari itu, perlu juga dilakukan perhitungan pembesaran momen torsi tak terduga pada arah X dan Y bangunan.

Untuk melakukan perhitungan pembesaran momen torsi tak terduga, ada baiknya kita mengetahui terlebih dahulu berapa *joint displacement* tiap lantainya. Caranya adalah klik CTRL+T → *Analysis Results* → *Joint Output* → *Displacement* → *OK*.

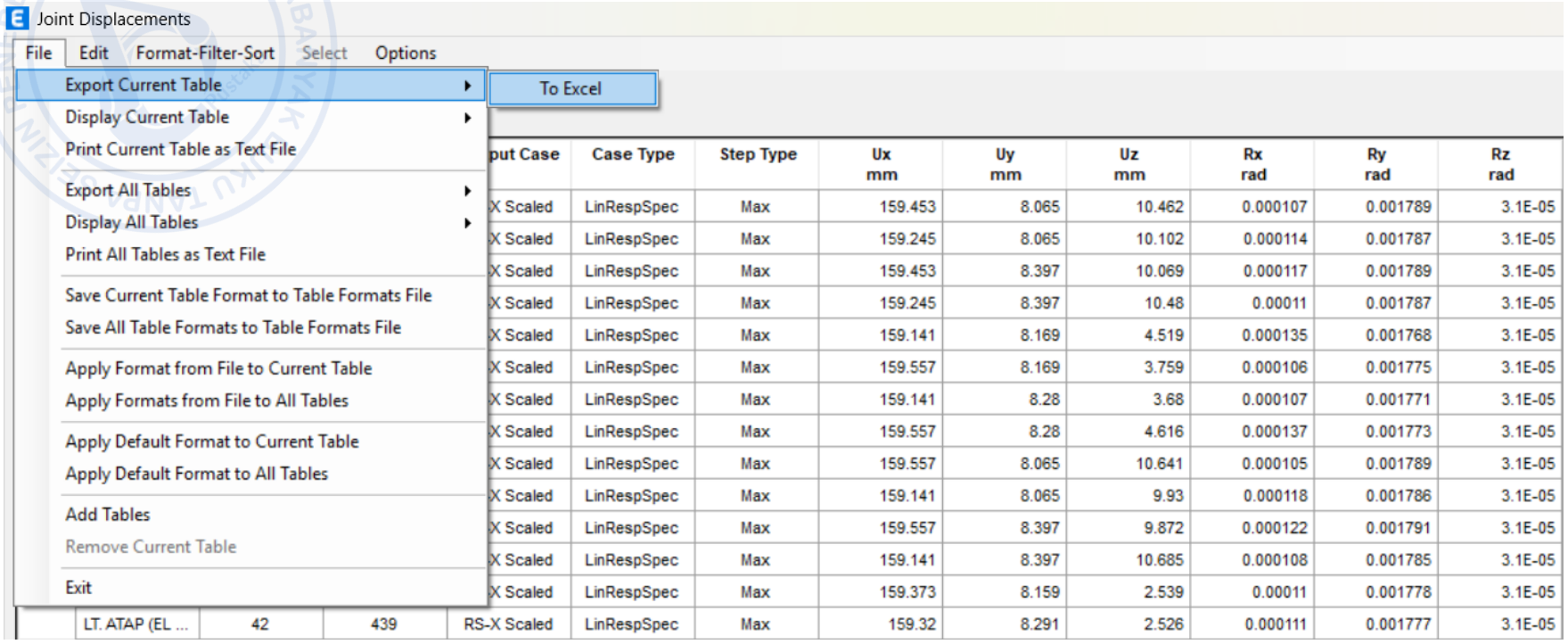


Gambar 6.3 *Choose Table for Display*

Setelah itu pada bagian *Output Case* pilih RS-X *Scaled* dan RS-Y *Scaled*, lalu pada menu *File* pilih opsi *Export Current Table to Excel*.

Tabel 6.3

Export Current Table to Excel



				put Case	Case Type	Step Type	Ux mm	Uy mm	Uz mm	Rx rad	Ry rad	Rz rad
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.453	8.065	10.462	0.000107	0.001789	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.245	8.065	10.102	0.000114	0.001787	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.453	8.397	10.069	0.000117	0.001789	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.245	8.397	10.48	0.00011	0.001787	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.141	8.169	4.519	0.000135	0.001768	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.557	8.169	3.759	0.000106	0.001775	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.141	8.28	3.68	0.000107	0.001771	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.557	8.28	4.616	0.000137	0.001773	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.557	8.065	10.641	0.000105	0.001789	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.141	8.065	9.93	0.000118	0.001786	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.557	8.397	9.872	0.000122	0.001791	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.141	8.397	10.685	0.000108	0.001785	3.1E-05
				X Scaled	LinRespSpec	Max	159.373	8.159	2.539	0.00011	0.001778	3.1E-05
	LT. ATAP (EL ...	42	439	RS-X Scaled	LinRespSpec	Max	159.32	8.291	2.526	0.000111	0.001777	3.1E-05

Lakukan penyortiran antara nilai minimum dan maksimum pada *joint displacement* arah X dan Y setiap lantai seperti yang ditunjukkan tabel di bawah.

Tabel 6.4
*Joint Displacement A*rah X

Rekap	JOINT DISPLACEMENT ARAH X			
Story	**δx min**	**δx max**	**Δy min**	**Δy max**
Dak	159.14	159.56	8.77	9.18
26	150.37	150.37	7.13	6.17
25	143.25	144.20	7.16	7.20
24	136.08	137.00	7.19	7.23
23	128.89	129.77	7.22	7.26
22	121.67	122.51	7.24	7.28
21	114.43	115.23	7.24	7.29
20	107.19	107.94	7.24	7.28
19	99.96	100.67	7.21	7.26
18	92.74	93.41	7.18	7.22
17	85.56	86.19	7.13	7.17
16	78.44	79.02	7.06	7.10
15	71.38	71.92	6.97	7.02
14	64.41	64.90	6.86	6.91
13	57.54	57.99	6.73	6.77
12	50.81	51.22	6.56	6.61
11	44.25	44.61	6.36	6.40
10	37.90	38.21	6.10	6.15
9	31.79	32.06	5.79	5.84
8	26.00	26.22	5.43	5.47
7	20.57	20.75	5.00	5.04
6	15.57	15.71	7.98	4.53
5	7.59	11.19	0.37	3.91
4	7.22	7.28	3.15	3.18
3	4.07	4.10	2.30	2.32
2	1.77	1.78	1.77	1.78
Dasar	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 6.5
Joint Displacement Arah Y

Rekap JOINT DISPLACEMENT ARAH Y

Story	δy min	δy max	Δy min	Δy max
Dak	148.64	148.91	8.09	7.93
26	140.55	140.98	6.68	6.70
25	133.87	134.28	6.72	6.74
24	127.15	127.54	6.74	6.75
23	120.41	120.79	6.75	6.77
22	113.66	114.02	6.76	6.78
21	106.90	107.24	6.75	6.77
20	100.15	100.48	6.73	6.75
19	93.42	93.72	6.70	6.72
18	86.72	87.01	6.66	6.67
17	80.06	80.33	6.59	6.61
16	73.47	73.72	6.52	6.54
15	66.95	67.18	6.43	6.45
14	60.52	60.74	6.32	6.34
13	54.21	54.40	6.18	6.20
12	48.03	48.20	6.03	6.05
11	42.00	42.16	5.84	5.86
10	36.16	36.29	5.62	5.64
9	30.54	30.66	5.35	5.37
8	25.19	25.28	5.03	5.05
7	20.15	20.23	4.67	4.68
6	15.49	15.55	7.53	4.25
5	7.96	11.30	0.42	3.73
4	7.54	7.57	3.12	3.13
3	4.42	4.44	2.41	2.42
2	2.01	2.02	2.01	2.02
Dasar	0.00	0.00	0.00	0.00

Langkah selanjutnya adalah membuat *sheet* Excel untuk menghitung pembesaran momen torsi tak terduga berdasarkan Pasal 7.8.4.3 SNI 1726:2019.

Tabel 6.6

Pembesaran Momen Torsi Tak Terduga Arah X

PERHITUNGAN FAKTOR PEMBESARAN TORSI
ARAH X (Ax X)

Project : BPAD
Building : Kantor

Syarat : Tanpa Ketidakberaturan Torsi : $dx_{max} < 1{,}2\ dx_{rata2}$
Ketidakberaturan Torsi Biasa (1A) : $1.2\ dx_{rata2} \le dx_{max} \le 1{,}4\ dx_{rata2}$
Ketidakberaturan Torsi Berlebihan (1B) : $1.4\ dx_{rata2} < dx_{max}$

h_i = Tinggi tingkat per lantai gedung

$$Ax = \left[\frac{\delta\ max}{1.2\ \delta\ avg}\right]^2$$

n	Strory	Diaph	Elevation	h_i	dx_{min}	dx_{max}	Ketidakberaturan Torsi		Perbesaran Torsi	Cek
							Biasa (1A)	Berlebihan (1B)	A_xX	
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
26	Dak	D1	113.2	5	0.1591	0.1596	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
25	26	D1	108.2	4.2	0.1504	0.1504	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
24	25	D1	104	4.2	0.1432	0.1442	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
23	24	D1	99.8	4.2	0.1361	0.1370	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
22	23	D1	95.6	4.2	0.1289	0.1298	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
21	22	D1	91.4	4.2	0.1217	0.1225	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
20	21	D1	87.2	4.2	0.1144	0.1152	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
19	20	D1	83	4.2	0.1072	0.1079	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
18	19	D1	78.8	4.2	0.1000	0.1007	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
17	18	D1	74.6	4.2	0.0927	0.0934	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
16	17	D1	70.4	4.2	0.0856	0.0862	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
15	16	D1	66.2	4.2	0.0784	0.0790	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
14	15	D1	62	4.2	0.0714	0.0719	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
13	14	D1	57.8	4.2	0.0644	0.0649	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
12	13	D1	53.6	4.2	0.0575	0.0580	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
11	12	D1	49.4	4.2	0.0508	0.0512	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
10	11	D1	45.2	4.2	0.0443	0.0446	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
9	10	D1	41	4.2	0.0379	0.0382	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
8	9	D1	36.8	4.2	0.0318	0.0321	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
7	8	D1	32.6	4.2	0.0260	0.0262	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
6	7	D1	28.4	4.2	0.0206	0.0208	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
5	6	D1	24.2	4.2	0.0156	0.0157	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
4	5	D1	20	4.2	0.0076	0.0112	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
3	4	D1	15.8	4.2	0.0072	0.0073	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
2	3	D1	11.6	4.2	0.0041	0.0041	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
1	2	D1	7.4	7.4	0.0018	0.0018	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK

Tabel 6.7
Pembesaran Momen Torsi Tak Terduga Arah Y

PERHITUNGAN FAKTOR PEMBESARAN TORSI
ARAH X (Ax X)

Syarat : Tanpa Ketidakberaturan Torsi : $dx_{max} < 1{,}2\ dx_{rata2}$
Ketidakberaturan Torsi Biasa (1A) : $1.2\ dx_{rata2} \le dx_{max} \le 1{,}4\ dx_{rata2}$
Ketidakberaturan Torsi Berlebihan (1B) : $1.4\ dx_{rata2} < dx_{max}$

h_i = Tinggi tingkat per lantai gedung

$$Ax = \left[\frac{\delta\ max}{1.2\ \delta\ avg}\right]^2$$

n	Strory	Diaph	Elevation	h_i	dx_{min}	dx_{max}	Ketidakberaturan Torsi		Perbesaran Torsi	Cek
							Biasa (1A)	Berlebihan (1B)	$A_x X$	
				(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
26	Dak	D1	113.2	5	0.1486	0.1489	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
25	26	D1	108.2	4.2	0.1406	0.1410	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
24	25	D1	104	4.2	0.1339	0.1343	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
23	24	D1	99.8	4.2	0.1271	0.1275	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
22	23	D1	95.6	4.2	0.1204	0.1208	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
21	22	D1	91.4	4.2	0.1137	0.1140	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
20	21	D1	87.2	4.2	0.1069	0.1072	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
19	20	D1	83	4.2	0.1002	0.1005	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
18	19	D1	78.8	4.2	0.0934	0.0937	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
17	18	D1	74.6	4.2	0.0867	0.0870	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
16	17	D1	70.4	4.2	0.0801	0.0803	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
15	16	D1	66.2	4.2	0.0735	0.0737	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
14	15	D1	62	4.2	0.0670	0.0672	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
13	14	D1	57.8	4.2	0.0605	0.0607	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
12	13	D1	53.6	4.2	0.0542	0.0544	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
11	12	D1	49.4	4.2	0.0480	0.0482	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
10	11	D1	45.2	4.2	0.0420	0.0422	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
9	10	D1	41	4.2	0.0362	0.0363	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
8	9	D1	36.8	4.2	0.0305	0.0307	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
7	8	D1	32.6	4.2	0.0252	0.0253	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
6	7	D1	28.4	4.2	0.0202	0.0202	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
5	6	D1	24.2	4.2	0.0155	0.0155	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
4	5	D1	20	4.2	0.0080	0.0113	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
3	4	D1	15.8	4.2	0.0075	0.0076	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
2	3	D1	11.6	4.2	0.0044	0.0044	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK
1	2	D1	7.4	7.4	0.0020	0.0020	TIDAK MEMILIKI	TIDAK MEMILIKI	1	OK

Activate W
Go to Setti

BAB 7

PENULANGAN SISTEM GANDA

A. Penulangan Lentur dan Geser Pada Balok

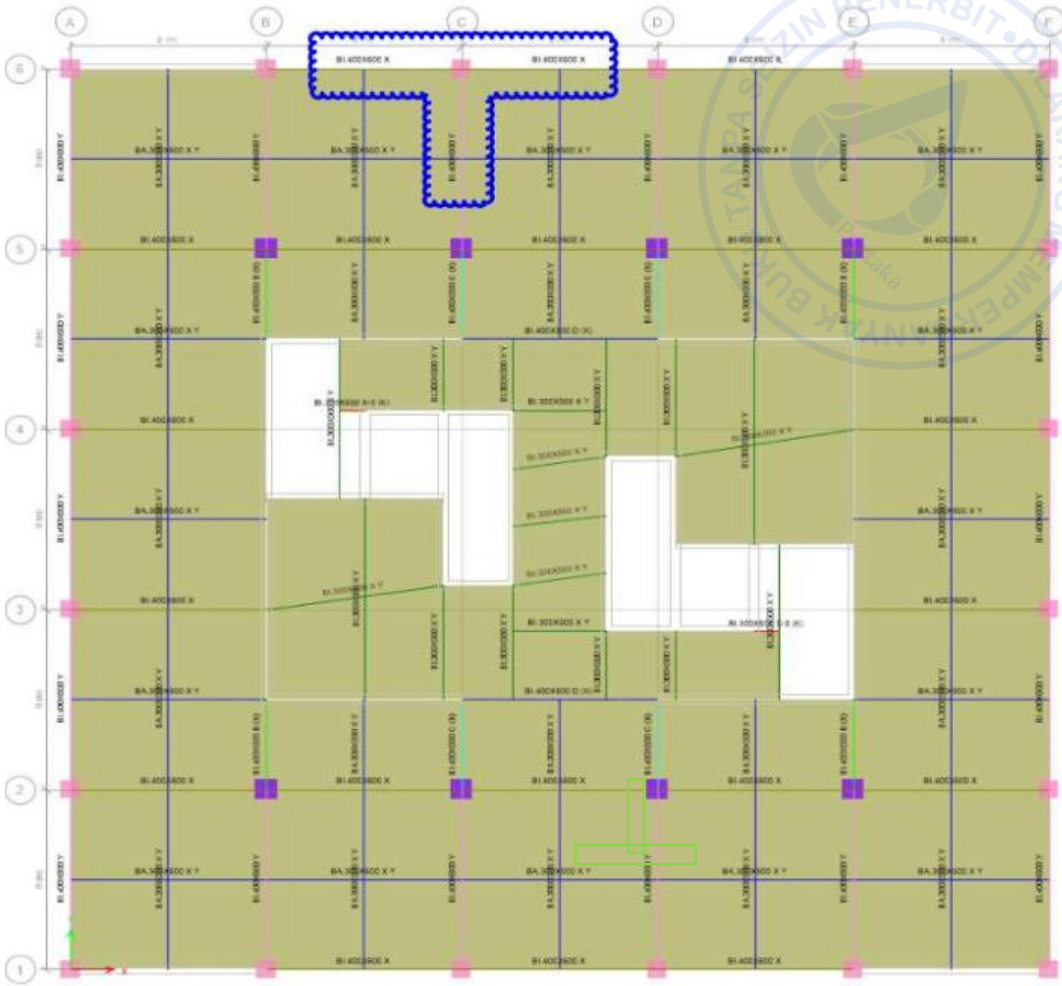
Penulangan untuk Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dalam SNI 2847:2019 dirancang untuk memastikan daktilitas tinggi dan kemampuan struktur beton bertulang dalam menyerap energi seismik tanpa kegagalan mendadak. Penulangan ini mencakup persyaratan khusus pada balok, kolom, dan sambungan untuk mencapai rotasi plastis yang memadai, dengan batasan rasio tulangan lentur maksimum sebesar 0,025 dan minimum 0,005 pada balok, serta penggunaan sengkang pengekang untuk mencegah *buckling* tulangan longitudinal. Ketentuan ini bertujuan untuk membentuk mekanisme plastis yang diinginkan, di mana balok mengalami *hinging* sebelum kolom, sesuai prinsip "*strong column-weak beam*", sehingga meningkatkan ketahanan keseluruhan struktur terhadap gempa.

Untuk balok SRPMK, penulangan lentur harus memenuhi ketentuan bahwa tulangan tarik dan tekan pada penampang harus mampu menahan momen positif dan negatif minimal 1/4 dan 1/2 dari momen maksimum, dengan jarak sengkang dibatasi maksimal d/2 atau 150 mm di zona plastis. Pada kolom, tulangan transversal berupa sengkang atau spiral harus menyediakan pengekangan yang cukup untuk menahan gaya aksial dan lentur, dengan jarak maksimal 1/4 dimensi terkecil kolom atau 100 mm, serta luas tulangan minimal 0,01 Ag. Sambungan balok-kolom memerlukan tulangan transversal yang kontinu untuk menahan geser dan memastikan *anchorage* tulangan balok melewati *joint* dengan panjang penyaluran yang memadai.

Perhitungan balok induk dibantu dengan program analisa struktur. Hasil perhitungan dari analisa struktur perlu dilakukan verifikasi dengan perhitungan manual supaya mengetahui bahwa hasil output dari program analisa struktur valid.

Penulangan SRPMK ini secara rinci diatur dalam SNI 2847:2019 pada Pasal 18, dengan subpasal 18.6 untuk balok, 18.7 untuk kolom, dan 18.8 untuk sambungan balok-kolom.

Sebagai *sample*, kita akan mengambil contoh balok dengan ukuran 400 mm x 600 mm, dan 300 mm x 500 mm yang diberi tanda awan berwarna biru seperti ditunjukkan gambar di bawah.



Gambar 7.1 *Sample* Penulangan Balok

Tabel 7.1
Cek Penulangan Balok B46-1

REINFORCEMENT BEAM

LANTAI 2 ELEVASI +7.4 m

BALOK 40 x 60

TABLE: Concrete Design 1 - Beam Summary Data - ACI 318-19

Tumpuan	Section	b	h	As perlu	D	Luas	n	As Aktual	Cek	di Pasang			AvS Perlu	D	Luas	n	jarak	AvS Aktual	Cek	di Pasang			
				mm²	mm	mm²		mm²					mm²/mm	mm	mm²		mm	mm²/mm					
Atas	BALOK 40 x 60	400	600	2400	19	283.385	14	3967.39	Aman	14	D	19	2.5	13	132.665	3	100	3.97995	Aman	D	13	-	100
Bawah	BALOK 40 x 60	400	600	1500	19	283.385	7	1983.695	Aman	7	D	19	2.5	13	132.665	3	100	3.97995	Aman	D	13	-	100
Lapangan		b	h	As perlu	D	Luas	n	As Aktual	Cek	di Pasang			Av / S	Ø	Luas	n	jarak			di Pasang			
				mm²	mm	mm²		mm²					mm²/mm	mm	mm²		mm	mm²/mm					
Atas	BALOK 40 x 60	400	600	300	19	283.385	2	566.77	Aman	2	D	19	2.5	13	132.665	3	150	2.6533	Aman	D	13	-	150
Bawah	BALOK 40 x 60	400	600	300	19	283.385	3	850.155	Aman	3	D	19	2.5	13	132.665	3	150	2.6533	Aman	D	13	-	150

LANTAI 2 ELEVASI +7.4 m

BALOK 40 x 60

TABLE: Concrete Design 1 - Beam Summary Data - ACI 318-19

TUMPUAN	LAPANGAN	TUMPUAN
14 D 19	2 D 19	14 D 19
7 D 19	3 D 19	7 D 19
3D13 - 100	3D13 - 150	3D13 - 100

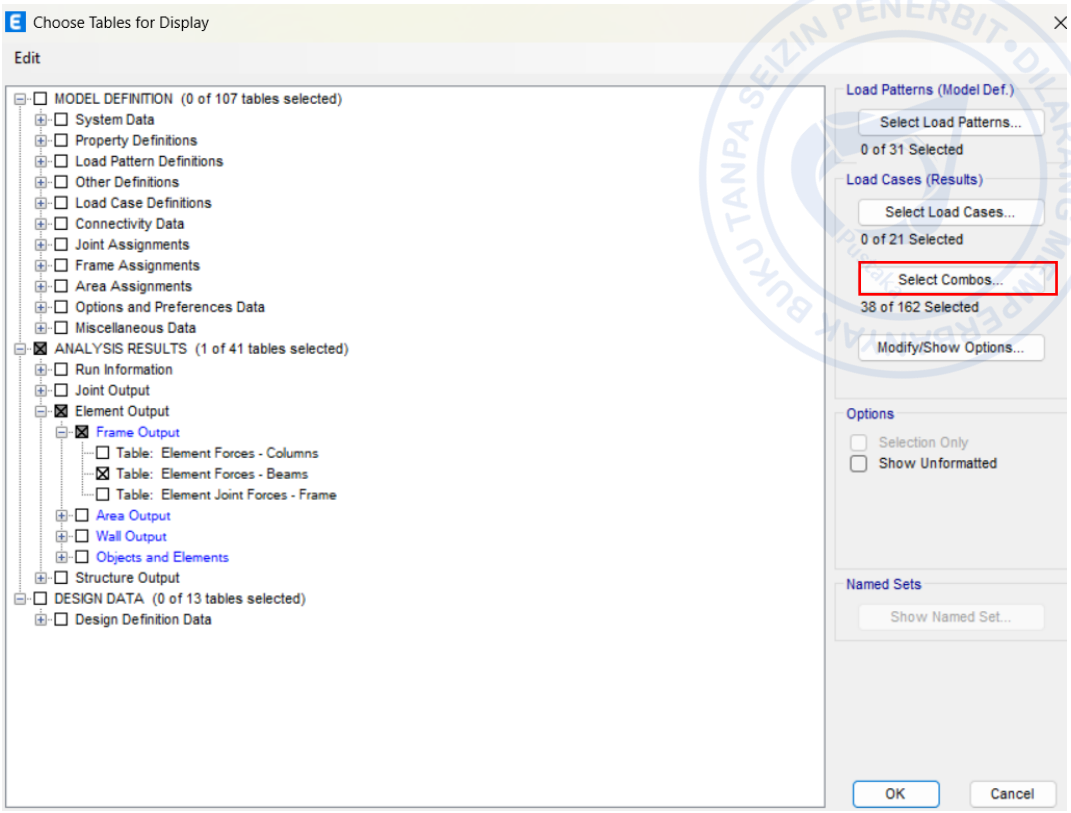
PERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT

Berdasarkan dari hasil perhitungan tabel di atas, penulis melakukan perbandingan kembali menggunakan perhitungan dengan cara yang lebih kompleks seperti ditunjukkan tabel di bawah ini.

Tabel 7.2
Properti Material dan Penampang

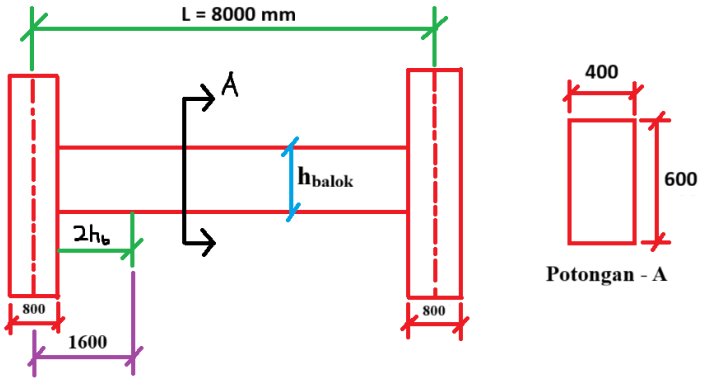
Properti Material dan Penampang					
Panjang Balok, L			Input	mm	8000
Lebar Balok, b			Input	mm	400
Tinggi Balok, h			Input	mm	600
Panjang Tumpuan	21.5.3.1	18.6.4.1	2 * h	mm	1200
Diameter Tulangan Longitudinal, d_b			Input	mm	19
Diameter Tulangan Pinggang, d_{bt}			Input	mm	13
Diameter Tulangan Sengkang, d_s			Input	mm	13
Selimut Bersih, c_c			Input	mm	40
Tinggi Efektif Balok, d			h - cc - ds - db - db - 30/2	mm	494
Kuat Tekan Beton, f_c'			Input	MPa	30
Kuat Leleh Tul. Longitudinal, f_y			Input	MPa	420
Kuat Leleh Tul. Transversal, f_{yv}			Input	MPa	420
β_1	10.2.7.3	Tabel 22.2.2.4.3	0.65 <= 0.85 - 0.05 * (fc' - 28) / 7 <= 0.85		0.8357
Panjang Kolom, c_1			Input (Sisi tegak lurus lebar balok)	mm	800
Lebar Kolom, c_2			Input (Sisi yang ditempel balok/sejajar lebar balok)	mm	800
L_n			L - c_1	mm	7200
λ			Asumsi tidak menggunakan beton ringan		1

Untuk mengetahui berapa nilai gaya dalam yang bekerja di dalam balok yang kita tinjau, caranya adalah dengan klik CTRL+T → *Analysis Results* → *Element Output* → *Frame Output* → *Table: Element Forces – Beams* → pada bagian *Select Combos* pilih semua kombinasi beban LRFD, *Service* dan untuk Vg.



Gambar 7.2 *Choose Tables for Display*

Setelah itu, *export* tabel tersebut ke Microsoft Excel untuk memudahkan dalam menghitung gaya dalam yang terjadi. Lakukan penyortiran pada semua kolom dengan cara memunculkan tanda panah sortir.



Gambar 7.3 Sketsa Balok B46-2

Bisa kita lihat pada gambar di atas bahwa batas pada tumpuannya adalah 1800 mm atau 1,8 meter. Maka dari itu, lakukan sortir pada kolom *Station*, yang disortir adalah hanya batas maksimum tumpuan, caranya adalah klik panah yang ada di *Station* → *Number Filter* → *Between* → isi pada bagian atas *is less than or equal to*

ketik angka 1.8 lalu *or* lalu pada bagian bawahnya *is less than or equal to* ketik angka 6.2 → *OK*.

Untuk mengetahui apa saja yang dimasukkan ke dalam *sheet* Excel yang akan dibandingkan, klik panah pada M3 → *Smallest to Largest*. Cara yang mirip bisa diterapkan pada bagian lapangan balok, hanya berbeda di bagian sortir *station*-nya saja. Caranya adalah klik panah yang ada di *Station* → *Number Filter* → *Between* → isi pada bagian atas *is less than or equal to* ketik angka 1.8 lalu *and* lalu pada bagian bawahnya *is less than or equal to* ketik angka 6.2 → *OK*.

Tabel 7.3

Sort on M3 from Smallest to Largest

TABLE: Element Forces - Beams													
Story	Beam	Unique Nan	Output Ca	Case Typ	Statio	P	V2	V3	T	M2	M3	Elemer	Elem Stati
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-3	Combination	0.4	-0.3376	-222.3851	0.0335	0.0063	0.0223	-533.9943	1380-1	0.4
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-4	Combination	0.4	-0.3376	-222.3851	0.0335	0.0063	0.0223	-533.9943	1380-1	0.4
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-3	Combination	0.7	-0.3376	-217.8973	0.0335	0.0063	0.0122	-467.952	1380-1	0.7
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-4	Combination	0.7	-0.3376	-217.8973	0.0335	0.0063	0.0122	-467.952	1380-1	0.7
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-3	Combination	0.4	-0.394	-153.3027	-0.0915	0.0042	-0.0381	-420.1716	1380-1	0.4
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-4	Combination	0.4	-0.3376	-153.0051	0.0335	0.0035	0.0223	-413.7546	1380-1	0.4
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-2	Combination	7.6	-0.3379	189.0895	-0.0342	-0.0049	0.0226	-411.2818	1380-8	0.6
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-3	Combination	1	-0.1457	-201.4659	-0.0088	0.0027	-0.0095	-403.6339	1380-2	0
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-4	Combination	1	-0.1457	-201.4659	-0.0088	0.0027	-0.0095	-403.6339	1380-2	0
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-3	Combination	1	-0.3376	-213.4094	0.0335	0.0063	0.0022	-403.256	1380-1	1
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-4	Combination	1	-0.3376	-213.4094	0.0335	0.0063	0.0022	-403.256	1380-1	1
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-1	Combination	7.6	-0.3991	184.1389	0.0913	-0.0054	-0.0378	-401.3637	1380-8	0.6
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-3	Combination	0.7	-0.394	-150.7289	-0.0915	0.0042	-0.0106	-374.5668	1380-1	0.7
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-2	Combination	7.6	-0.3379	144.5759	-0.0342	-0.0029	0.0226	-371.4136	1380-8	0.6
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-4	Combination	0.7	-0.3376	-150.4313	0.0335	0.0035	0.0122	-368.2392	1380-1	0.7
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-1	Combination	7.6	-0.3991	139.6252	0.0913	-0.0034	-0.0378	-361.4955	1380-8	0.6
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-2	Combination	7.3	-0.3379	184.6017	-0.0342	-0.0049	0.0123	-355.2281	1380-8	0.3
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-1	Combination	7.3	-0.3991	179.651	0.0913	-0.0054	-0.0104	-346.7952	1380-8	0.3
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-3	Combination	1	-0.1156	-142.0658	-0.0192	0.0016	-0.0037	-330.0992	1380-2	0
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-3	Combination	1	-0.394	-148.1551	-0.0915	0.0042	0.0168	-329.7342	1380-1	1
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-2	Combination	7.3	-0.3379	142.002	-0.0342	-0.0029	0.0123	-328.4269	1380-8	0.3
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-6	Combination	0.4	-0.2039	-158.5189	-0.217	0.0064	-0.103	-324.0271	1380-1	0.4
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-4	Combination	1	-0.1457	-140.2897	-0.0088	0.001	-0.0095	-323.8872	1380-2	0
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-4	Combination	1	-0.3376	-147.8575	0.0335	0.0035	0.0022	-323.4958	1380-1	1
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 7-1	Combination	7.3	-0.3991	137.0514	0.0913	-0.0034	-0.0104	-319.994	1380-8	0.3
LT. 13 (EL +53.60)	B2	1380	LRFD 6-3	Combination	1.5	-0.1457	-193.9862	-0.0088	0.0027	-0.0051	-304.7708	1380-2	0.5

Tabel 7.4
Input Gaya Dalam dan Cek Syarat Geometri

Gaya Dalam					
$M_{u,tumpuan}$ (-)			Input	kN-m	-533.994
$M_{u,tumpuan}$ (+)			Input	kN-m	279.7872
$M_{u,lapangan}$ (-)			Input	kN-m	-209.648
$M_{u,lapangan}$ (+)			Input	kN-m	206.0401
Pu			Input	kN	1
Syarat Gaya dan Geometri					
Syarat Gaya Aksial	21.5.1.1	Tidak dipersyaratkan. Baca R18.6.1 dan 18.6.4.7	Pu <= 0.1 A_g f_c' ?		**OK**
Syarat Tinggi Efektif	21.5.1.2	18.6.2.1	L_n >= 4d ?		**OK**
Syarat Lebar 1	21.5.1.3	18.6.2.1	b >= min(0.3h, 250 mm) ?		**OK**
Syarat Lebar 2	21.5.1.4	18.6.2.1	b <= c_2 + 2 * min (c_2, 0.75 c_1) ?		**OK**

Tabel 7.5
Penulangan Lentur pada Tumpuan Negatif/Bagian Atas Balok

Penulangan Lentur					
Tumpuan Negatif					
Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan, n			Input		14
d_b				mm	19
Jarak Bersih Antar Tulangan			$(b - 2\,c_c - 2\,d_s - n * d_b) / (n - 1)$	mm	2.154
Cek Jarak Bersih	7.6.1	25.2.1	Jarak Bersih >= d_b dan 25 mm?		TIDAK
Jumlah Lapis					2
As Pasang			$n * \pi/4 * d_b^2$	mm^2	3969.402
$As_{min,1}$	10.5.1	9.6.1.2	$(f_c')^{0.5} / (4 * f_y) * b * d$	mm^2	700.954
$As_{min,2}$	10.5.1, 21.5.2.1	9.6.1.2	$1.4 / (4 * f_y) * b * d$	mm^2	716.667
Cek As min			As Pasang >= As min ?		**OK**
ρ			As / (b * d)		1.85%
$\rho_{max,1}$	B.10.3	Tidak ada	$0.75\,\rho_b = 0.75 * 0.85 * \beta_1 * f_c' / f_y * (600/(600 + f_y))$		2.24%
$\rho_{max,2}$	21.5.2.1	18.6.3.1	2.5%		2.50%
Cek As max			ρ <= ρ max ?		**OK**
a	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy / (0.85 * fc' * b)	mm	163.446
M_n	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy * (d - a/2)	kN-m	759.848
c	10.2.7.1	22.2.2.4.1	a / β1	mm	195.576
ε_s	10.2.2, 10.2.3	22.2.1.2, 22.2.2.1	(d - c) / c * 0.003		0.005
ϕ	S9.3.2	Tabel 21.2.2	0.65 <= 0.65 + (εs - 0.002) / 0.003 * 0.25 <= 0.9		0.900
ϕM_n			ϕ * Mn	kN-m	683.863
$M_{u,tumpuan}$ (-)				kN-m	533.994
Cek Kapasitas			$\phi M_n > M_u$?		**OK**
As Perlu			Mu / [fy * (d - a/2)]	mm^2	2789.555

Tabel 7.6
Penulangan Lentur pada Tumpuan Positif/Bagian Bawah Balok

Tumpuan Positif					
n			Input		7
d_b				mm	19
Jarak Bersih Antar Tulangan			$(b - 2\ c_c - 2\ d_s - n * d_b) / (n - 1)$	mm	26.833
Cek Jarak Bersih	7.6.1	25.2.1	Jarak Bersih >= d_b dan 25 mm?		IYA
Jumlah Lapis					1
As Pasang			$n * \pi/4 * d_b^2$	mm^2	1984.701
$As_{min,1}$	10.5.1	9.6.1.2	$(f_c')^{0.5} / (4 * f_y) * b * d$	mm^2	700.954
$As_{min,2}$	10.5.1, 21.5.2.1	9.6.1.2	$1.4 / (4 * fy) * b * d$	mm^2	716.667
$As_{min,4}$	21.5.2.2	18.6.3.2	0.5 * As Tumpuan Negatif	mm^2	1984.701
Cek As min			As Pasang >= As min ?		**OK**
ρ			As / (b * d)		0.92%
$\rho_{max,1}$	B.10.3		$0.75\ \rho_b = 0.75 * 0.85 * \beta_1 * f_c' / f_y * (600/(600 + f_y))$		2.24%
$\rho_{max,2}$	21.5.2.1	18.6.3.1	2.5%		2.50%
Cek As max			ρ <= ρ max ?		**OK**
a	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy / (0.85 * fc' * b)	mm	81.723
M_n	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy * (d - a/2)	kN-m	413.985
c	10.2.7.1	22.2.2.4.1	a / β1	mm	97.788
ε_s	10.2.2, 10.2.3	22.2.1.2, 22.2.2.1	(d - c) / c * 0.003		0.013
ϕ	S9.3.2	Tabel 21.2.2	0.65 <= 0.65 + (εs - 0.002) / 0.003 * 0.25 <= 0.9		0.900
ϕM_n			ϕ * Mn	kN-m	372.587
M_u				kN-m	279.787
Cek $\phi M_n > M_u$			$\phi M_n > M_u$?		**OK**
As Perlu			Mu / [fy * (d - a/2)]	mm^2	1341.338

Berdasarkan Tabel 7.6 dan 7.7, dapat disimpulkan bahwa jumlah tulangan lemur di bagian tumpuan atas dan bawah pada balok B46 dengan jumlah 14 buah pada bagian atas dan 7 buah pada bagian bawah, lalu hasilnya adalah **OK**.

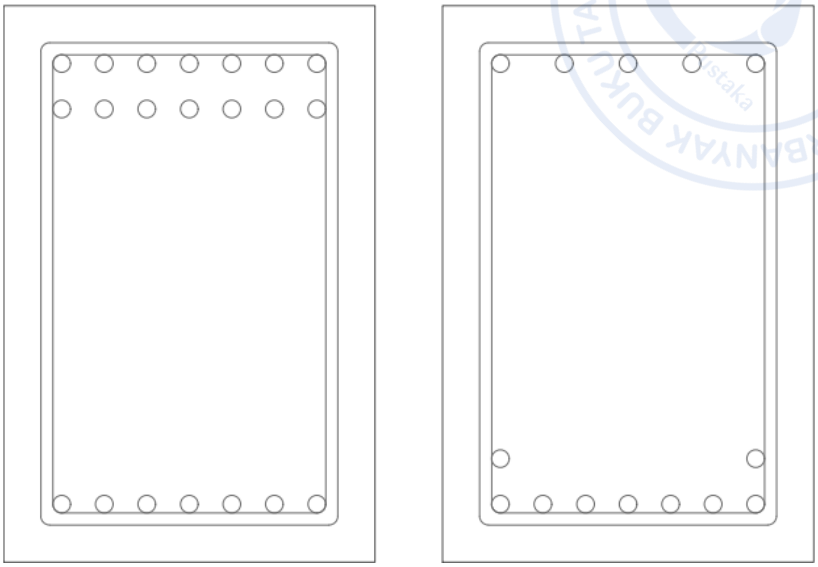
Tabel 7.7
Penulangan Lentur pada Lapangan Negatif/Bagian Atas Balok

Lapangan Negatif					
n			Input		5
d_b				mm	19
Jarak Bersih Antar Tulangan			$(b - 2\,c_c - 2\,d_s - n * d_b) / (n - 1)$	mm	49.750
Cek Jarak Bersih	7.6.1	25.2.1	Jarak Bersih >= d_b dan 25 mm?		IYA
Jumlah Lapis					1
As Pasang			$n * \pi/4 * d_b^2$	mm^2	1417.644
$As_{min,1}$	10.5.1	9.6.1.2	$(f_c')^{0.5} / (4 * f_y) * b * d$	mm^2	700.954
$As_{min,2}$	10.5.1, 21.5.2.1	9.6.1.2	$1.4 / (4 * fy) * b * d$	mm^2	716.667
$As_{min,4}$	21.5.2.2	18.6.3.2	0.25 * As Tumpuan Negatif	mm^2	992.351
Cek As min			As Pasang >= As min ?		**OK**
ρ			As / (b * d)		0.66%
$\rho_{max,1}$	B.10.3		$0.75\,\rho_b = 0.75 * 0.85 * \beta_1 * f_c' / f_y * (600/(600 + f_y))$		2.24%
$\rho_{max,2}$	21.5.2.1	18.6.3.1	2.5%		2.50%
Cek As max			$\rho <= \rho$ max ?		**OK**
a	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy / (0.85 * fc' * b)	mm	58.374
M_n	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy * (d - a/2)	kN-m	302.655
c	10.2.7.1	22.2.2.4.1	a / β1	mm	69.849
ε_s	10.2.2, 10.2.3	22.2.1.2, 22.2.2.1	(d - c) / c * 0.003		0.020
ϕ	S9.3.2	Tabel 21.2.2	0.65 <= 0.65 + (εs - 0.002) / 0.003 * 0.25 <= 0.9		0.900
ϕM_n			ϕ * Mn	kN-m	272.389
M_u				kN-m	209.648
Cek $\phi M_n > M_u$			$\phi M_n > M_u$?		**OK**
As Perlu			Mu / [fy * (d - a/2)]	mm^2	981.995

Tabel 7.8
Penulangan Lentur pada Lapangan Positif/Bagian Bawah Balok

Lapangan Positif					
n			Input		9
d_b				mm	19
Jarak Bersih Antar Tulangan			$(b - 2\ c_c - 2\ d_s - n * d_b) / (n - 1)$	mm	15.375
Cek Jarak Bersih	7.6.1	25.2.1	Jarak Bersih >= d_b dan 25 mm?		TIDAK
Jumlah Lapis					2
As Pasang			$n * \pi/4 * d_b^2$	mm^2	2551.759
$As_{min,1}$	10.5.1	9.6.1.2	$(f_c')^{0.5} / (4 * f_y) * b * d$	mm^2	700.954
$As_{min,2}$	10.5.1, 21.5.2.1	9.6.1.2	1.4 / (4 * fy) * b * d	mm^2	716.667
$As_{min,4}$	21.5.2.2	18.6.3.2	0.25 * As Tumpuan Negatif	mm^2	992.351
Cek As min			As Pasang >= As min ?		**OK**
ρ			As / (b * d)		1.19%
$\rho_{max,1}$	B.10.3		$0.75\ \rho_b = 0.75 * 0.85 * \beta_1 * f_c' / f_y * (600/(600 + f_y))$		2.24%
$\rho_{max,2}$	21.5.2.1	18.6.3.1	2.5%		2.50%
Cek As max			ρ <= ρ max ?		**OK**
a	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy / (0.85 * fc' * b)	mm	105.072
M_n	10.2.7.1	22.2.2.4.1	As * fy * (d - a/2)	kN-m	519.754
c	10.2.7.1	22.2.2.4.1	a / β1	mm	125.728
ε_s	10.2.2, 10.2.3	22.2.1.2, 22.2.2.1	(d - c) / c * 0.003		0.010
ϕ	S9.3.2	Tabel 21.2.2	0.65 <= 0.65 + (εs - 0.002) / 0.003 * 0.25 <= 0.9		0.900
ϕM_n			ϕ * Mn	kN-m	467.779
M_u				kN-m	206.040
Cek $\phi M_n > M_u$			$\phi M_n > M_u$?		**OK**
As Perlu			Mu / [fy * (d - a/2)]	mm^2	1011.563

Berdasarkan Tabel 7.6 dan 7.7 dapat disimpulkan bahwa jumlah tulangan lemur di bagian tumpuan atas dan bawah pada balok B46 dengan jumlah 14 buah pada bagian atas dan 7 buah pada bagian bawah, lalu hasilnya adalah **OK**.



Gambar 7.4 Sketsa Penulangan Balok B46-2 Daerah Tumpuan dan Lapangan

B. Penulangan Lentur dan Geser Pada Kolom

Penulangan lentur pada kolom dalam SNI 2847:2019 mengacu pada penggunaan tulangan longitudinal untuk menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur, yang sering terjadi pada kolom sebagai elemen vertikal utama. Tulangan ini dirancang berdasarkan konsep penampang tekan dengan lentur, di mana luas tulangan minimum diatur untuk memastikan daktilitas dan pengendalian retak, sementara luas maksimum dibatasi untuk menghindari keruntuhan tekan yang rapuh. Rasio tulangan longitudinal minimum adalah 0,01 dari luas penampang bruto (Ag), sedangkan maksimum 0,06 Ag untuk kolom nonseismik, dengan penyesuaian untuk kolom komposit atau prategang. Perhitungan ini memperhitungkan faktor reduksi kekuatan (φ) sebesar 0,65 untuk kolom tekan murni dan hingga 0,9 untuk kolom dengan lentur dominan, memastikan kapasitas nominal melebihi beban terfaktor.

Penulangan geser pada kolom melibatkan tulangan transversal seperti sengkang atau spiral untuk menahan gaya geser lateral, yang dapat timbul dari beban angin atau gempa. Kekuatan geser nominal (Vn) dihitung sebagai penjumlahan kekuatan beton (Vc) dan kekuatan tulangan (Vs), dengan Vc diambil sebagai $0{,}17\sqrt{f'c}\ b\ d$ untuk kolom tanpa beban aksial signifikan. Tulangan transversal minimum diwajibkan jika gaya geser terfaktor (Vu) melebihi $0{,}5\ \varphi\ Vc$, dengan luas sengkang (Av) minimal $0{,}75\sqrt{f'c}\ b\ s / fy$ atau $0{,}4\ b\ s / fy$. Jarak sengkang dibatasi maksimum 16

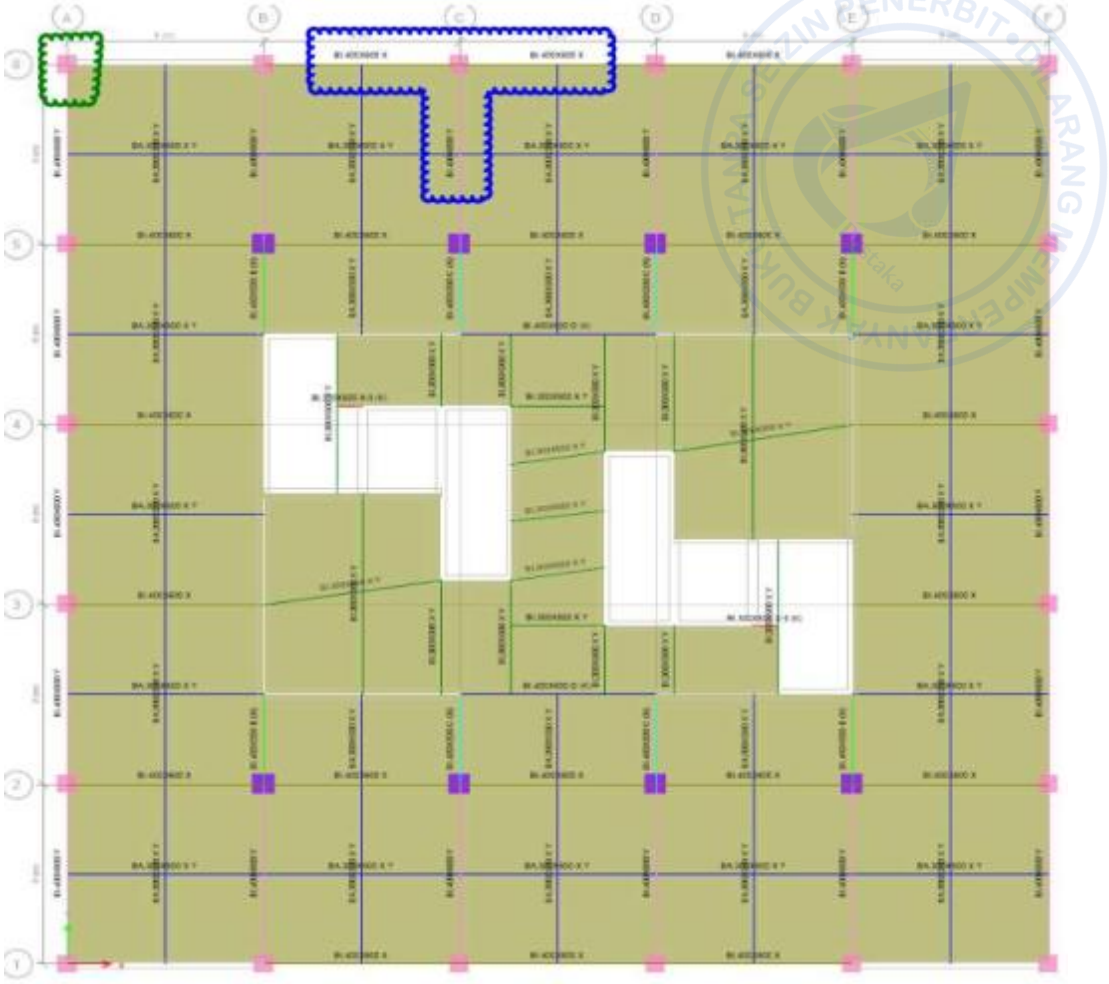
kali diameter tulangan longitudinal atau 48 kali diameter sengkang untuk memastikan pengekangan yang cukup terhadap *buckling*.

Penulangan geser pada kolom SRPMK memerlukan perhitungan Vs dengan asumsi Vc = 0 di zona plastis jika gaya geser tinggi, menggunakan tulangan transversal yang lebih rapat untuk menahan geser seismik. Jarak sengkang di zona tumpuan dibatasi maksimum 100 mm atau 1/4 dimensi kolom terkecil, sementara di lapangan hingga 150 mm, dengan luas Av minimal berdasarkan rumus pengekang untuk mencegah kegagalan geser diagonal. Ketentuan ini memastikan kolom tetap stabil selama deformasi besar, dengan integrasi faktor *overstrength* dari SNI 1726:2019.

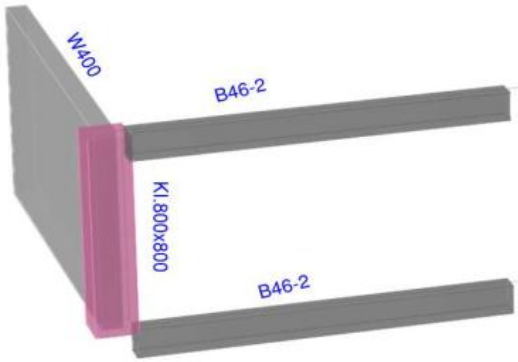
Secara keseluruhan, penulangan lentur dan geser pada kolom dalam standar ini menekankan keseimbangan antara kekuatan, daktilitas, dan ekonomi, dengan evaluasi melalui diagram interaksi untuk lentur dan rumus empiris untuk geser. Persyaratan ini diterapkan untuk berbagai kategori risiko bangunan, memastikan keamanan struktural terhadap beban gravitasi dan lateral.

Perhitungan balok induk dibantu dengan program analisa struktur. Hasil perhitungan dari analisa struktur perlu dilakukan verifikasi dengan perhitungan manual supaya mengetahui bahwa hasil output dari program analisa struktur valid.

Di bawah ini adalah sampel kolom yang akan dianalisis (ditandai dengan awan berwarna hijau).

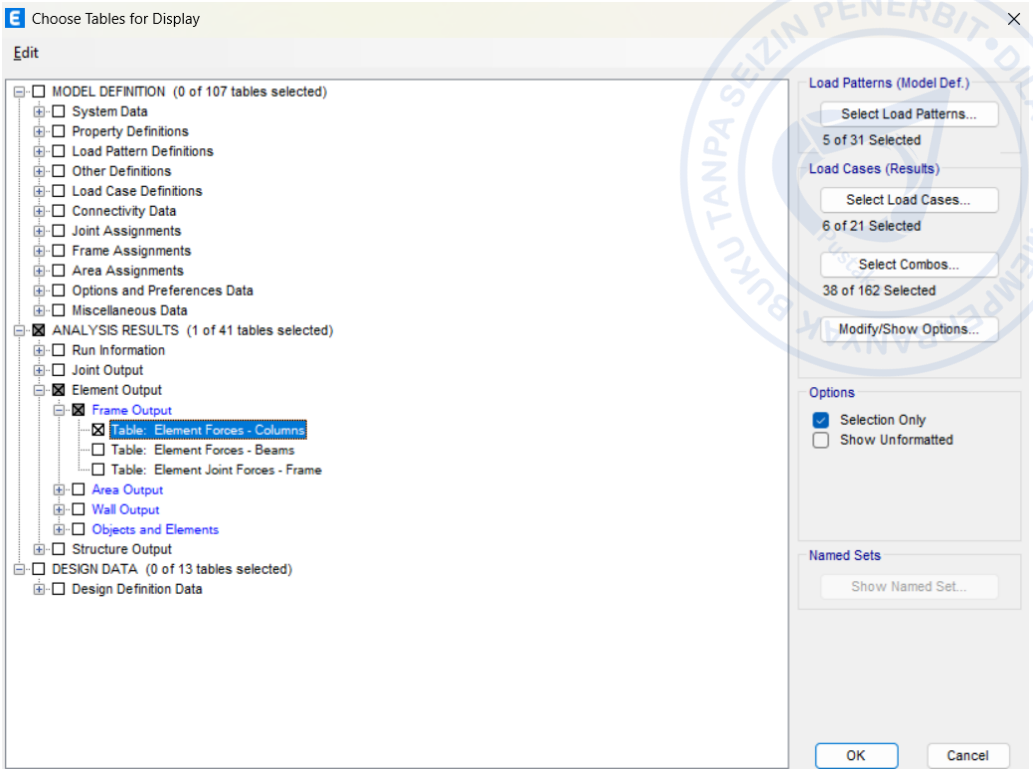


Gambar 7.5 *Sample* Penulangan Kolom



Gambar 7.6 Sketsa Kolom 800 x 800

Untuk mengetahui berapa nilai gaya dalam yang bekerja di dalam kolom yang kita tinjau, caranya adalah dengan klik CTRL+T → *Analysis Results* → *Element Output* → *Frame Output* → *Table: Element Forces – Column* → pada bagian *Select Combos* pilih semua kombinasi beban LRFD, lalu *Export to Excel*.



Gambar 7.7 *Choose Tables for Display*

Tabel 7.9
Hasil Expor *Element Forces - Column*

TABLE: Element Forces - Columns

Story	Column	Unique Name	Output Case	Case Type	Step Type	Station	P	V2	V3	T	M2	M3	Element	Elem Station
						m	kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m		m
LT. 13 (EL	C1	14	SE-X	LinStatic		0	1757.783	3.8336	-1.8366	-0.2062	-2.9852	22.6077	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	SE-X	LinStatic		1.8	1757.783	3.8336	-1.8366	-0.2062	0.3207	15.7071	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	SE-X	LinStatic		3.6	1757.783	3.8336	-1.8366	-0.2062	3.6266	8.8066	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	SE-Y	LinStatic		0	-389.911	-0.5936	29.5521	-0.076	66.7368	-0.8676	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	SE-Y	LinStatic		1.8	-389.911	-0.5936	29.5521	-0.076	13.5431	0.2009	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	SE-Y	LinStatic		3.6	-389.911	-0.5936	29.5521	-0.076	-39.6507	1.2694	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Uns	LinRespSpe	Max	0	1063.385	3.7803	0.9209	0.1222	2.0168	9.029	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Uns	LinRespSpe	Max	1.8	1063.385	3.7803	0.9209	0.1222	1.0073	10.9058	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Uns	LinRespSpe	Max	3.6	1063.385	3.7803	0.9209	0.1222	1.8592	15.7782	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Uns	LinRespSpe	Max	0	142.3907	0.3879	9.7382	0.0551	22.7449	0.6246	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Uns	LinRespSpe	Max	1.8	142.3907	0.3879	9.7382	0.0551	9.1954	1.0841	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Uns	LinRespSpe	Max	3.6	142.3907	0.3879	9.7382	0.0551	16.3183	1.7132	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Scaled	LinRespSpe	Max	0	1848.99	6.573	1.6012	0.2124	3.5068	15.6994	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Scaled	LinRespSpe	Max	1.8	1848.99	6.573	1.6012	0.2124	1.7514	18.9627	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	RS-X Scaled	LinRespSpe	Max	3.6	1848.99	6.573	1.6012	0.2124	3.2328	27.4347	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Scaled	LinRespSpe	Max	0	252.1139	0.6868	17.2422	0.0976	40.2716	1.1059	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Scaled	LinRespSpe	Max	1.8	252.1139	0.6868	17.2422	0.0976	16.2811	1.9194	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	RS-Y Scaled	LinRespSpe	Max	3.6	252.1139	0.6868	17.2422	0.0976	28.8929	3.0334	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		0	-4216.89	-4.0639	50.0597	2.3007	89.2448	-7.9012	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		1.8	-4178.93	-4.0639	50.0597	2.3007	-0.8627	-0.5863	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		3.6	-4140.97	-4.0639	50.0597	2.3007	-90.9701	6.7287	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		0	-4720.34	-6.3331	69.8898	4.0098	124.4436	-12.3197	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		1.8	-4687.81	-6.3331	69.8898	4.0098	-1.358	-0.9202	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		3.6	-4655.27	-6.3331	69.8898	4.0098	-127.16	10.4794	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-2	Combination		0	-4720.23	-6.3333	69.8865	4.0094	124.4379	-12.3196	14	0

Munculkan tanda panah penyortiran pada setiap kolom, lalu pindahkan kolom M2 dan M3 tepat setelah kolom P agar lebih mudah dalam menyalin gaya-gaya dalam tersebut. Setelah itu, pilih *Output Case* hanya gaya LRFD saja.

Tabel 7.10

Element Forces – Column yang Akan Disortir

TABLE: Element Forces - Columns

Story	Colum	Unique Nam	Output Ca	Case Typ	Step Ty	Statio	P	M2	M3	V2	V3	T	Eleme	Elem Statior
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		0	-4216.89	89.2448	-7.9012	-4.0639	50.0597	2.3007	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		1.8	-4178.93	-0.8627	-0.5863	-4.0639	50.0597	2.3007	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 1-1	Combination		3.6	-4140.97	-90.9701	6.7287	-4.0639	50.0597	2.3007	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		0	-4720.34	124.4436	-12.3197	-6.3331	69.8898	4.0098	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		1.8	-4687.81	-1.358	-0.9202	-6.3331	69.8898	4.0098	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-1	Combination		3.6	-4655.27	-127.16	10.4794	-6.3331	69.8898	4.0098	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-2	Combination		0	-4720.23	124.4379	-12.3196	-6.3333	69.8865	4.0094	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-2	Combination		1.8	-4687.7	-1.3578	-0.9196	-6.3333	69.8865	4.0094	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 2-2	Combination		3.6	-4655.16	-127.153	10.4804	-6.3333	69.8865	4.0094	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-1	Combination		0	-4908.34	119.247	-11.3685	-5.8447	66.9452	3.5753	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-1	Combination		1.8	-4870.38	-1.2544	-0.8481	-5.8447	66.9452	3.5753	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-1	Combination		3.6	-4832.42	-121.756	9.6723	-5.8447	66.9452	3.5753	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-2	Combination		0	-4720.23	124.4381	-12.3196	-6.3333	69.8864	4.0094	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-2	Combination		1.8	-4687.7	-1.3575	-0.9196	-6.3333	69.8864	4.0094	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-2	Combination		3.6	-4655.16	-127.153	10.4804	-6.3333	69.8864	4.0094	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-3	Combination		0	-3614.79	76.5578	-6.7722	-3.4832	42.9487	1.974	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-3	Combination		1.8	-3582.25	-0.7499	-0.5024	-3.4832	42.9487	1.974	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-3	Combination		3.6	-3549.72	-78.0576	5.7674	-3.4832	42.9487	1.974	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-4	Combination		0	-3614.83	76.5446	-6.7728	-3.483	42.9398	1.9733	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-4	Combination		1.8	-3582.29	-0.747	-0.5033	-3.483	42.9398	1.9733	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-4	Combination		3.6	-3549.76	-78.0385	5.7662	-3.483	42.9398	1.9733	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-5	Combination		0	-4305.57	106.4795	-10.2394	-5.2649	59.7832	3.2453	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-5	Combination		1.8	-4273.03	-1.1304	-0.7625	-5.2649	59.7832	3.2453	14	1.8
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-5	Combination		3.6	-4240.5	-108.74	8.7143	-5.2649	59.7832	3.2453	14	3.6
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-6	Combination		0	-3614.47	76.5283	-6.7724	-3.4839	42.9305	1.9719	14	0
LT. 13 (EL	C1	14	LRFD 3-6	Combination		1.8	-3581.93	-0.7465	-0.5014	-3.4839	42.9305	1.9719	14	1.8

Kemudian sortir menjadi nilai *largest to smallest* di kolom P untuk mendapatkan nilai Pmax, lalu salin sampai ke kolom M3. Lakukan cara yang sama untuk mendapatkan nilai Pmin, M2max, M2min, M3max, dan M3min.

Tabel 7.11

Element Forces – Column yang Telah Disortir Berupa Aksial - Lentur

Aksial - Lentur			
Kondisi	**P (kN)**	**M2 (kN-m)**	**M3 (kN-m)**
P max	1848.990	3.507	15.699
P min	-6844.050	92.888	-40.051
M2 Max	-5903.418	202.957	-20.944
M2 Min	-4459.977	-167.582	14.444
M3 Max	1848.990	3.233	27.435
M3 Min	-6844.050	92.888	-40.051

Setelah itu, beralih ke *software* SPColumn untuk memasukkan nilai-nilai Pmax, Pmin, M2max, M2min, M3max, dan M3min tadi dan sesuaikan seperti gambar di bawah ini.

Gambar 7.8 *Software SPColumn*

PROJECT

General

Design code	ACI 318-19	
Unit system	Metric	
Bar set	User-defined	>
Confinement	Tied	>
Section capacity	Critical capacity	ⓘ

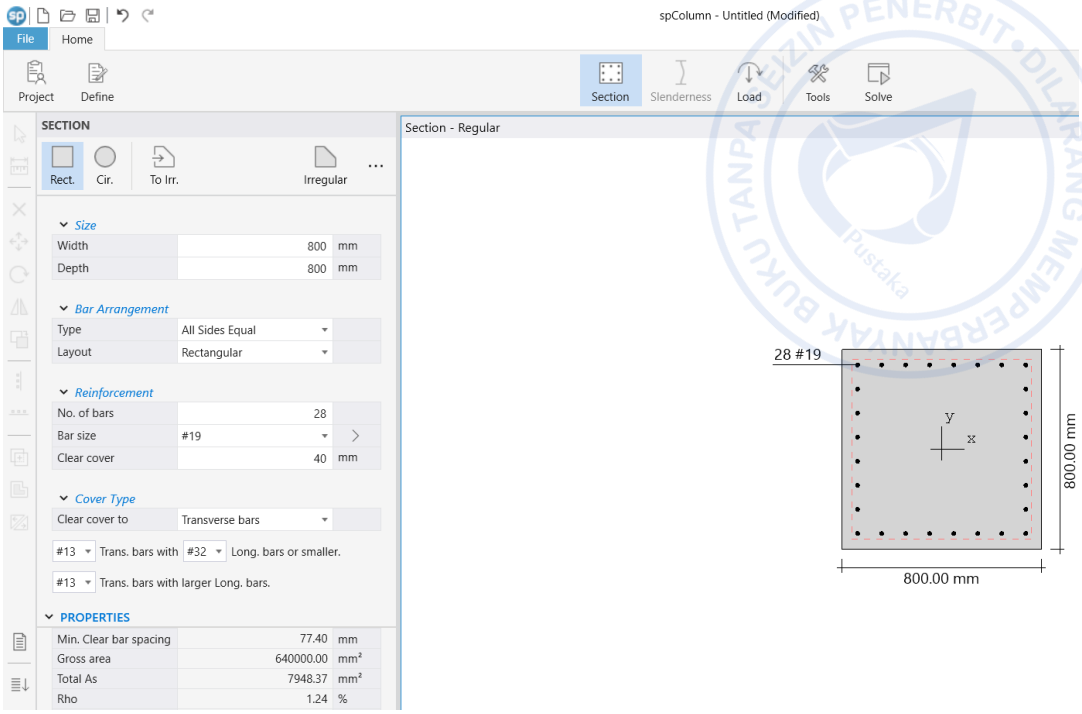
Materials

Strength, f'c - MPa	30	>
Strength, fy - MPa	420	>

Run Options

Run Option	Investigation	>
Run Axis	Biaxial	
Consider Slenderness	No	>

Gambar 7.9 Penyesuaian Mutu Bahan



Gambar 7.10 Penyesuaian *Section*

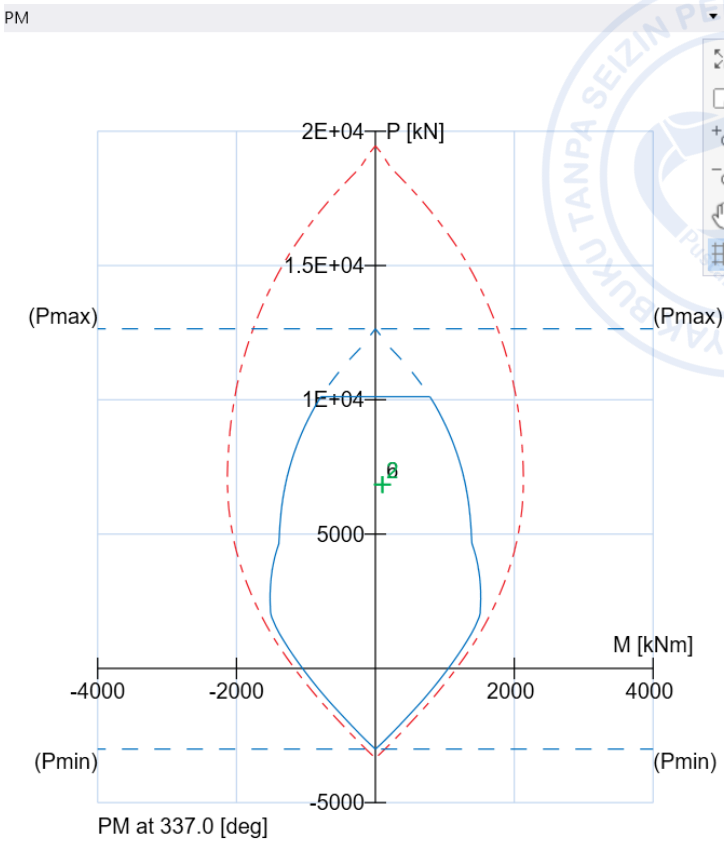
Input semua nilai aksial – lentur yang kita peroleh tadi di bagian *Load* → *Factored Loads*. Kemudian klik tombol F5 untuk *Execute*.

Tabel 7.12
Input Factored Loads

Factored Loads

+ New | ✕ Delete | Remove Duplicates | Import / Export

No.	Pu	M(ux)	M(uy)
	kN	kNm	kNm
1	1848.99	3.507	15.699
2	-6844.05	92.888	-40.051
3	-5903.418	202.957	-20.944
4	-4459.977	-167.582	14.444
5	1848.99	3.233	27.435
6	-6844.05	92.888	-40.051



Gambar 7.11 Diagram Interaksi Kolom Dengan Gaya yang Paling Besar

Bisa dilihat pada gambar di atas bahwa gaya yang paling besar titiknya masih berada di dalam diagram interaksi yang berwarna biru. Maka dari itu, dapat dikatakan bahwa desain kolom ini **aman**.

Langkah selanjutnya adalah dengan mengekspor tabel yang telah dianalisis ke Excel. Lalu hitung nilai Mnx dan Mny dengan cara membagi nilai ϕMnx dan ϕMnx dengan ϕ. Ambil nilai absolut terkecilnya, lalu masukkan ke *sheet* Excel untuk menganalisis kolom SRMPK dan mengecek syarat *Strong Column Weak Beam* (*SCWB*).

Tabel 7.13
Summary Mnx dan Mny

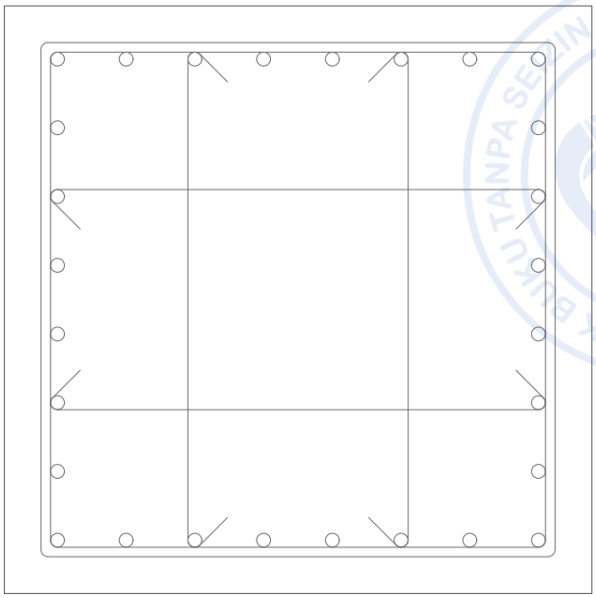
Factored Loads and Moments with Corresponding Capacity Ratios												
NOTE: Calculations are based on "Critical Capacity" Method.												
No.	Demand			Capacity			Parameters at Capacity			Capacity Ratio		
	P_u	M_{ux}	M_{uy}	ϕP_n	ϕM_{nx}	ϕM_{ny}	NA Depth	ε_t	ϕ			
	kN	kNm	kNm	kN	kNm	kNm	mm				Mnx	Mny
1	2256.590	109.779	136.411	0.000	898.900	1116.600	265.000	0.008	0.900	0.122	998.7778	1240.667
2	6831.050	183.631	-32.463	10116.930	5367.700	949.500	861.000	0.000	0.650	0.034	5964.111	1055
3	5246.030	308.093	94.273	10116.930	1360.300	416.200	979.000	0.000	0.650	0.226	1511.444	462.4444
4	6610.467	-326.529	-104.033	10116.930	3903.500	1243.700	912.000	0.000	0.650	0.084	4337.222	1381.889
5	5514.010	-77.159	359.732	10116.930	333.000	1410.000	855.000	0.000	0.650	0.255	370	1566.667
6	6342.486	82.798	-341.935	10116.930	327.500	1352.300	861.000	0.000	0.650	0.253	363.8889	1502.556

Tabel 7.14
Cek SCWB

Parameter	Pasal Referensi		Persamaan	Satuan	Nilai
	SNI 2847:2013	SNI 2847:2019			
Properti Material dan Penampang					
Panjang/Tinggi Kolom, L			Input	mm	4200
Sisi Pendek Kolom, b			Input	mm	800
Sisi Panjang Kolom, h			Input	mm	800
Diameter Tulangan Longitudinal, d_b			Input	mm	19
Diameter Tulangan Sengkang, d_s			Input	mm	13
Selimut Bersih, c_c			Input	mm	50
Kuat Tekan Beton, f_c'			Input	MPa	30
Kuat Leleh Tul. Longitudinal, f_y			Input	MPa	420
Kuat Leleh Tul. Transversal, f_{yv}			Input	MPa	420
Tinggi Balok, h_b			Input	mm	600
L_n			L - hb	mm	3600

Syarat Gaya dan Geometri					
Syarat Gaya Aksial	21.6.1	Tidak dipersyaratkan. Baca R18.7.1	Pu > 0.1 A_g f_c' ?		OK
Syarat Sisi Terpendek	21.6.1.1	18.7.2.1	b >= 300 mm ?		OK
Syarat Rasio Dimensi Penampang	21.6.1.2	18.7.2.1	b/h >= 0.4 ?		OK
Pengecekan Terhadap Gaya Dalam Aksial-Lentur (Menggunakan PCA Column, atau SP Column, atau CSI Column, dll.)					
Jumlah Tulangan, n			Input		28
Luas Tulangan Longitudinal, A_s			n *π/4 *d_b^2	mm^2	7938.8
Rasio Tulangan, ρ			As / (b * h)		1.24%
Cek ρ_{min} dan ρ_{max}	21.6.3.1	18.7.4.1	1% <= ρ <= 6%		OK
Pengecekan Strong Column - Weak Beam (SCWB)					
Momen Nominal Kolom, M_{nc}			Input (M_n dari kondisi P_{max} dan P_{min})	kN m	370
M_n^- Tumpuan Balok			Input	kN m	376.909
M_n^+ Tumpuan Balok			Input	kN m	235.860
Cek SCWB	21.6.2.2	18.7.3.2	2 * M_{nc} >= 1.2 * (M_n^- + M_n^+)		OK

PERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT DILARANG MEMPERBANYAK



Gambar 7.12 Sketsa Penulangan Kolom 800 x 800

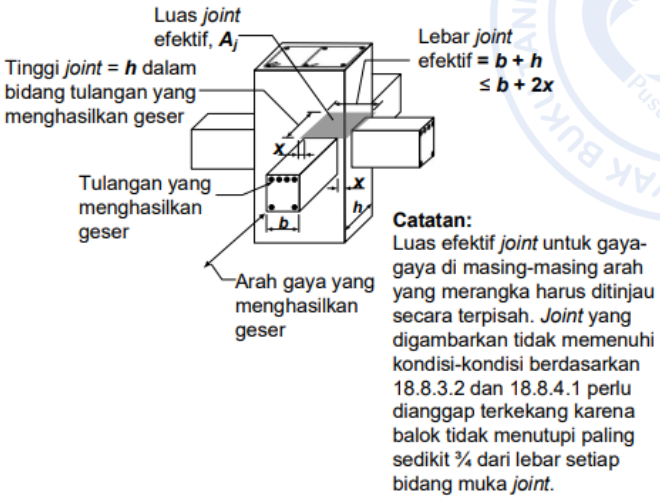
C. Penulangan Geser Joint Balok - Kolom

Hubungan balok-kolom dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.8 merujuk pada sambungan struktural antara elemen balok dan kolom pada struktur beton bertulang, yang berfungsi sebagai titik transfer gaya aksial, lentur, dan geser. Sambungan ini menjadi elemen kritis terutama dalam desain tahan gempa, karena kegagalan pada hubungan dapat menyebabkan keruntuhan progresif struktur. Ketentuan ini menekankan prinsip desain yang memastikan daktilitas tinggi, sehingga sambungan mampu menyerap energi seismik tanpa kegagalan mendadak. Pada struktur dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), hubungan balok-kolom dirancang untuk membentuk sendi plastis pada balok, bukan pada kolom, sesuai konsep "*strong column-weak beam*". Hal ini memerlukan evaluasi kekuatan nominal sambungan terhadap gaya geser yang dihitung dari kombinasi beban gravitasi dan lateral.

Implikasi hubungan balok-kolom dalam desain keseluruhan adalah peningkatan ketahanan struktur terhadap guncangan, dengan penekanan pada kategori risiko tinggi. Ketentuan ini memastikan bahwa sambungan tidak menjadi titik lemah, sehingga struktur tetap stabil dan aman untuk okupansi pasca-gempa. Perubahan dari SNI 2847:2013 ke 2019 mencakup penyesuaian rumus dan detailing untuk lebih selaras dengan ACI 318-19, meningkatkan efisiensi tanpa mengurangi keamanan.

Gaya-gaya pada tulangan longitudinal balok di muka *joint* harus dihitung dengan mengasumsikan tegangan pada tulangan tarik lentur adalah 1,25fy. Tulangan longitudinal balok yang dihentikan di dalam suatu kolom harus diteruskan ke muka

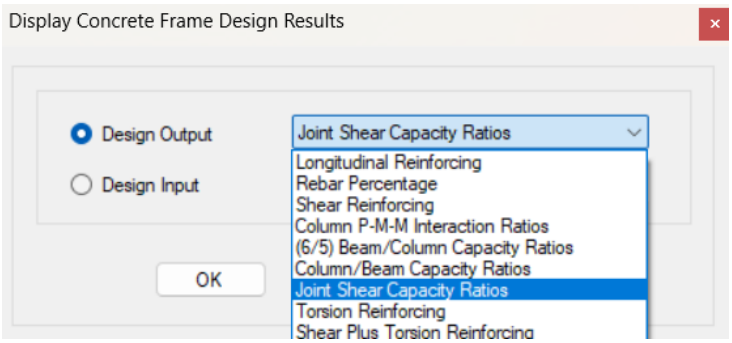
terjauh dari inti kolom terkekang dan harus disalurkan dalam tarik sesuai Pasal 18.8.5 dan dalam tekan sesuai Pasal 25.4.9 SNI 2847:2019.



Gambar 7.13 Luas *Joint* Efektif

Bila tulangan longitudinal balok diteruskan melalui *joint* balok-kolom, dimensi kolom yang paralel dengan tulangan balok tersebut tidak boleh kurang dari 20 kali diameter tulangan longitudinal terbesar balok untuk beton normal (*normal weight*). Untuk beton ringan (*light weight*), dimensinya tidak boleh kurang dari 26 kali diameter tulangan.

Untuk mengetahui nilai rasio *joint shear capacity* pada ETABS, caranya adalah klik Shift+Ctrl+F6 → *Joint Shear Capacity Ratios*.



Gambar 7.14 *Joint Shear Capacity Ratios*

Tabel 7.15
Kekuatan Geser Nominal *Joint*

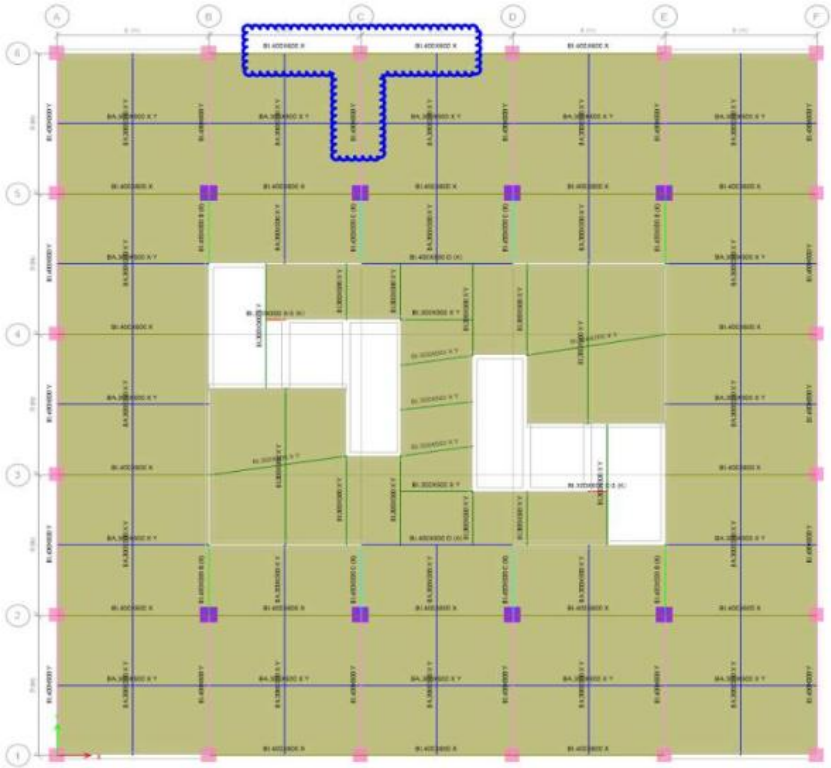
Konfigurasi *Joint*	V_n
Untuk *joint* yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya [1]	$1,7\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]
Untuk *joint* yang terkekang oleh balok-balok pada tiga sisinya atau dua sisi berlawanan[1]	$1,2\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]
Untuk kasus-kasus lainnya	$1,0\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ [2]

[1]Mengacu pada 18.8.4.2

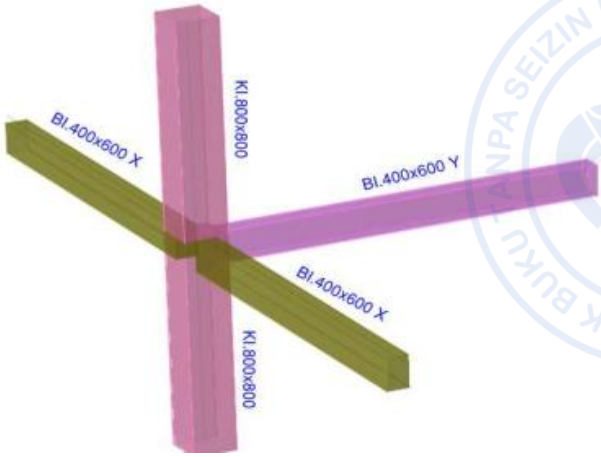
[2] λ diambil 0,75 untuk beton ringan dan 1,0 untuk beton normal. Nilai A_j berdasarkan 18.8.4.3

(Sumber: Tabel 18.8.4.1 SNI 2847:2019)

Untuk menganalisis penulangan geser pada *joint* balok – kolom, terlebih dahulu mengambil sampel yang akan dijadikan acuan seperti di bawah ini.

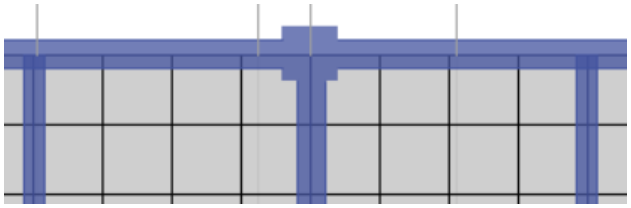


Gambar 7.15 *Sample* Penulangan Geser *Joint* Balok - Kolom

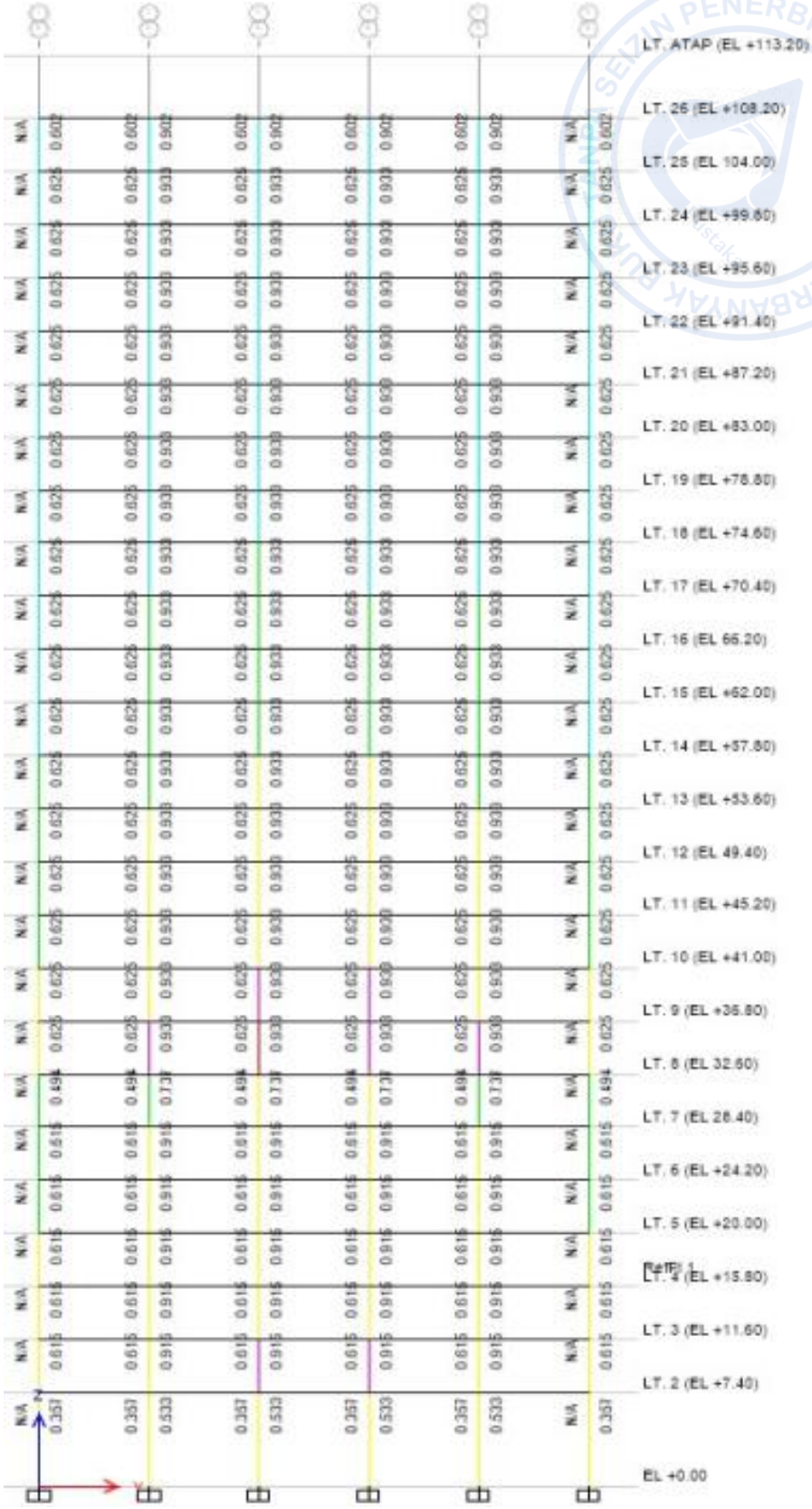


Gambar 7.16 Tiga Dimensi *Sample* Penulangan Geser *Joint* Balok – Kolom

Jika lebih diperhatikan lagi, posisi balok dan kolom yang akan dianalisis berada pas AS. Jadi AS balok tepat di tengah AS kolom.



Gambar 7.17 Letak AS Kolom dan Balok



Gambar 7.18 *Cek Joint Shear Capacity Ratios* AS G2-A

Balok induk yang digunakan berukuran 400 x 600 dan kolom berukuran 800 x 800, sehingga balok yang kita desain termasuk balok yang merangka, bukan mengekang (lihat Pasal 18.8.4.2) yang mengatakan bahwa lebar balok $\geq \frac{3}{4}$ lebar kolom. Dihitung dari rumus tersebut, didapat bahwa lebar balok kurang dari $\frac{3}{4}$ lebar kolom, maka nilai c = 1.

Tabel 7.16
Input Properti Material

Parameter	Pasal Referensi SNI 2847:2019	Persamaan	Satuan	Nilai	
Properti Material dan Penampang					
Lebar Y Kolom, b		Input	mm	800	
Lebar X Kolom, h		Input	mm	800	
Panjang Kolom, L		Input	mm	4200	
Kuat Tekan Beton, f_c'		Input	MPa	30	
Kuat Leleh Baja Tulangan, f_y		Input	MPa	420	
Faktor Beton λ				1	
Tinggi Balok Terbesar, h_b		Input	mm	600	
Panjang Bersih Kolom, L_n		L - h_b	mm	3600	
Data Lebar dan Eksentrisitas Balok					
Lebar Balok 1, bb1		Gambar	mm	0	
Lebar Balok 2, bb2		Gambar	mm	400	
Lebar Balok 3, bb3		Gambar	mm	400	
Lebar Balok 4, bb4		Gambar	mm	400	
x1a	R18.8.4	Input [default: (h-bb1)/2]	mm	400	OK
x1b	R18.8.4	Input [default: (h-bb1)/2]	mm	400	
Cek Lebar Sisi Kolom 1		bb1+x1a+x1b	mm	800	
x2a	R18.8.4	Input [default: (h-bb2)/2]	mm	200	OK
x2b	R18.8.4	Input [default: (h-bb2)/2]	mm	200	
Cek Lebar Sisi Kolom 1		bb2+x2a+x2b	mm	800	
x3a	R18.8.4	Input [default: (b-bb3)/2]	mm	200	OK
x3b	R18.8.4	Input [default: (b-bb3)/2]	mm	200	
Cek Lebar Sisi Kolom 1		bb3+x3a+x3b	mm	800	
x4a	R18.8.4	Input [default: (b-bb4)/2]	mm	200	OK
x4b	R18.8.4	Input [default: (b-bb4)/2]	mm	200	
Cek Lebar Sisi Kolom 1		bb4+x4a+x4b	mm	800	

Tabel 7.17
Input Dimensi *Joint* dan Gaya Tulangan Balok

Dimensi Joint				
x terkecil sisi 1, x1		MIN (x1a, x1b)	mm	400
x terkecil sisi 2, x2		MIN (x2a, x2b)	mm	200
x terkecil sisi 3, x3		MIN (x3a, x3b)	mm	200
x terkecil sisi 4, x4		MIN (x4a, x4b)	mm	200
Lebar Joint Sisi 1, bj1	18.8.4.3	MIN (bb1+h, bb1+2*x1)	mm	800
Lebar Joint Sisi 2, bj2	18.8.4.3	MIN (bb2+h, bb2+2*x2)	mm	800
Lebar Joint Sisi 3, bj3	18.8.4.3	MIN (bb3+h, bb3+2*x3)	mm	800
Lebar Joint Sisi 4, bj4	18.8.4.3	MIN (bb4+h, bb4+2*x4)	mm	800
Lebar Efektif Joint Y, b_j		MIN (bj1, bj2)	mm	800
Lebar Efektif Joint X, h_j		MIN (bj3, bj4)	mm	800
Luas Efektif Joint Gempa X, A_{jx}	18.8.4.3	$b_j * h$	mm^2	640000
Luas Efektif Joint Gempa Y, A_{jy}	18.8.4.3	$b * h_j$	mm^2	640000
Cek Tinggi Joint	18.8.2.4	h_j >= 1/2 h_b ?		OK
Data dan Gaya Tulangan Balok				
Diameter Tulangan Utama Balok, d_b		Input		19
Cek Dimensi Kolom	18.8.2.3	b >= 20 * db ?		OK
Tulangan Atas Balok 1, A_s'1		Gambar	mm^2	0.000
Tulangan Bawah Balok 1, A_s'*1		Gambar	mm^2	0.000
Tulangan Atas Balok 2, A_s'2		Gambar	mm^2	3969.402
Tulangan Bawah Balok 2, A_s'*2		Gambar	mm^2	1984.701
Tulangan Atas Balok 3, A_s'3		Gambar	mm^2	3969.402
Tulangan Bawah Balok 3, A_s'*3		Gambar	mm^2	1984.701
Tulangan Atas Balok 4, A_s'4		Gambar	mm^2	3969.402
Tulangan Bawah Balok 4, A_s'*4		Gambar	mm^2	1984.701
Tegangan Probable Tulangan, f_{pr}	18.8.2.1	$1.25 * f_y$	MPa	525
Gaya Tulangan Atas Balok 1, F_s'1	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	0
Gaya Tulangan Bawah Balok 1, F_s'*1	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	0
Gaya Tulangan Atas Balok 2, F_s'2	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	2083936
Gaya Tulangan Bawah Balok 2, F_s'*2	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	1041968
Gaya Tulangan Atas Balok 3, F_s'3	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	2083936
Gaya Tulangan Bawah Balok 3, F_s'*3	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	1041968
Gaya Tulangan Atas Balok 4, F_s'4	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	2083936
Gaya Tulangan Bawah Balok 4, F_s'*4	18.8.2.1	$A_s * f_{pr}$	N	1041968

Tabel 7.18
Input Gaya Geser

Gaya Geser Akibat Balok				
Geser Ketika Arah Gempa X-		$F_s^-3 + C4 = F_s^-3 + F_s^+4$	N	3125904
Geser Ketika Arah Gempa X+		$F_s^-4 + C3 = F_s^-4 + F_s^+3$	N	3125904
Geser Ketika Arah Gempa Y-		$F_s^-1 + C2 = F_s^-1 + F_s^+2$	N	1041968
Geser Ketika Arah Gempa Y+		$F_s^-2 + C1 = F_s^-2 + F_s^+1$	N	2083936
Gaya Geser Kolom (Beam Hinging)				
M_{pr}^- Balok 1		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	0
M_{pr}^+ Balok 1		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	0
M_{pr}^- Balok 2		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	461511778
M_{pr}^+ Balok 2		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	816582621
M_{pr}^- Balok 3		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	461511778
M_{pr}^+ Balok 3		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	816582621
M_{pr}^- Balok 4		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	461511778
M_{pr}^+ Balok 4		Input [Excel Desain Balok]	Nmm	816582621
V_e Balok 1		Input [Excel Desain Balok]	N	0
V_e Balok 2		Input [Excel Desain Balok]	N	297162
V_e Balok 3		Input [Excel Desain Balok]	N	297162
V_e Balok 4		Input [Excel Desain Balok]	N	297162
Geser Kolom Ketika Arah Gempa X-		$[(M_{pr}^+4+M_{pr}^-3)+(V_e3+V_e4)*h/2]/L_n$	N	421062
Geser Kolom Ketika Arah Gempa X+		$[(M_{pr}^+3+M_{pr}^-4)+(V_e3+V_e4)*h/2]/L_n$	N	421062
Geser Kolom Ketika Arah Gempa Y-		$[(M_{pr}^+2+M_{pr}^-1)+(V_e1+V_e2)*h/2]/L_n$	N	259847
Geser Kolom Ketika Arah Gempa Y+		$[(M_{pr}^+1+M_{pr}^-2)+(V_e1+V_e2)*h/2]/L_n$	N	161216

Tabel 7.19
Input Gaya Geser Total *Joint*

Gaya Geser Total Joint				
Geser Joint Ketika Arah Gempa X-		$F_s + C - V_{col}$	N	2704842
Geser Joint Ketika Arah Gempa X+		$F_s + C - V_{col}$	N	2704842
Geser Joint Ketika Arah Gempa Y-		$F_s + C - V_{col}$	N	782122
Geser Joint Ketika Arah Gempa Y+		$F_s + C - V_{col}$	N	1922720
Kuat Geser Joint				
Konfigurasi Joint	18.8.4.1			3
Faktor Pengali Kuat Geser, c	18.8.4.1	c		1
Kuat Geser Nominal Joint Gempa X, V_{nX}	18.8.4.1	$c * \lambda * \sqrt{f_c'} * A_{jX}$	N	3505424
Kuat Geser Nominal Joint Gempa Y, V_{nY}	18.8.4.1	$c * \lambda * \sqrt{f_c'} * A_{jY}$	N	3505424
Faktor Reduksi, Φ	21.2.4.3			0.85
Kuat Geser Joint Gempa X, ΦV_{nX}	18.8.4.1	$\Phi * V_{nX}$	N	2979611
Kuat Geser Joint Gempa X, ΦV_{nY}	18.8.4.1	$\Phi * V_{nY}$	N	2979611
Gaya Geser Joint Gempa X, V_{uX}		MAX (Geser Joint Gempa X)	N	2704842
Gaya Geser Joint Gempa Y, V_{uY}		MAX (Geser Joint Gempa Y)	N	1922720
Faktor Keamanan Gempa X, SF_X		$\Phi V_{nX} / V_{uX}$		1.102
Faktor Keamanan Gempa Y, SF_Y		$\Phi V_{nY} / V_{uY}$		1.550
Cek Kuat Geser Joint		SF >= 1 ?		**OK**
Tulangan Transversal				
Tulangan transversal joint	18.8.3.2	digunakan confinement = tumpuan kolom		
Panjang Penyaluran Tarik				
l_{dh} hitung	18.8.5.1	$f_y * d_b / (5.4 * \lambda * \sqrt{f_c'})$	mm	269.804
l_{dh} pakai	18.8.5.1	MAX(ldh, 8 db, 150)	mm	269.804

D. Pengecekan Rasio SCWB

Rasio *Strong Column Weak Beam* (SCWB) dalam SNI 2847:2019 merupakan prinsip desain seismik yang bertujuan untuk memastikan bahwa kolom memiliki kekuatan lentur yang lebih besar daripada balok yang terhubung padanya, sehingga sendi plastis terbentuk terlebih dahulu pada balok selama kejadian gempa. Prinsip ini mencegah kegagalan mendadak pada kolom, yang dapat menyebabkan keruntuhan progresif struktur, dan mempromosikan perilaku duktil struktur secara keseluruhan. Rasio SCWB dihitung sebagai perbandingan antara jumlah kekuatan lentur nominal kolom (ΣMnc) di atas dan di bawah sambungan dengan jumlah kekuatan lentur nominal balok (ΣMnb) yang menumpu pada sambungan tersebut. Ketentuan ini diterapkan pada Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk meningkatkan ketahanan bangunan terhadap beban gempa, dengan mempertimbangkan faktor *overstrength* dari SNI 1726:2019.

Implikasi dari penerapan rasio SCWB adalah peningkatan biaya material karena kolom yang lebih kuat, tetapi hal ini diimbangi dengan peningkatan keamanan dan umur pakai struktur. Standar ini menekankan bahwa pengecekan SCWB harus

dilakukan setelah penentuan dimensi awal, dengan penyesuaian jika diperlukan untuk memenuhi batas minimum. Prinsip ini selaras dengan standar internasional seperti ACI 318, yang menjadi dasar SNI 2847:2019, dan bertujuan untuk mengurangi risiko kerusakan berat pada bangunan di wilayah rawan gempa seperti Indonesia.

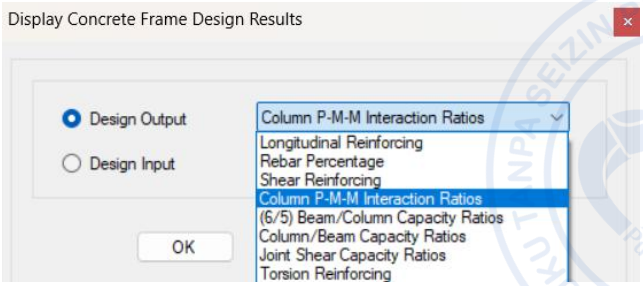
Secara keseluruhan, rasio SCWB merupakan elemen kunci dalam filosofi desain tahan gempa, yang mendorong pembentukan hierarki kekuatan struktural untuk mencapai performa *Immediate Occupancy* atau *Life Safety*. Ketentuan ini juga memengaruhi pemilihan material beton dan baja tulangan, dengan penekanan pada kualitas tinggi untuk mencapai daktilitas yang diinginkan. Dengan demikian, rasio SCWB tidak hanya sebagai persyaratan teknis, tetapi juga sebagai strategi mitigasi risiko seismik yang holistik.

Ketentuan mengenai rasio SCWB ini secara rinci diatur dalam SNI 2847:2019 pada Pasal 18.7.3.2, yang menyatakan bahwa $\Sigma Mnc \geq 1{,}2\ \Sigma Mnb$ untuk memenuhi prinsip *Strong Column Weak Beam*.

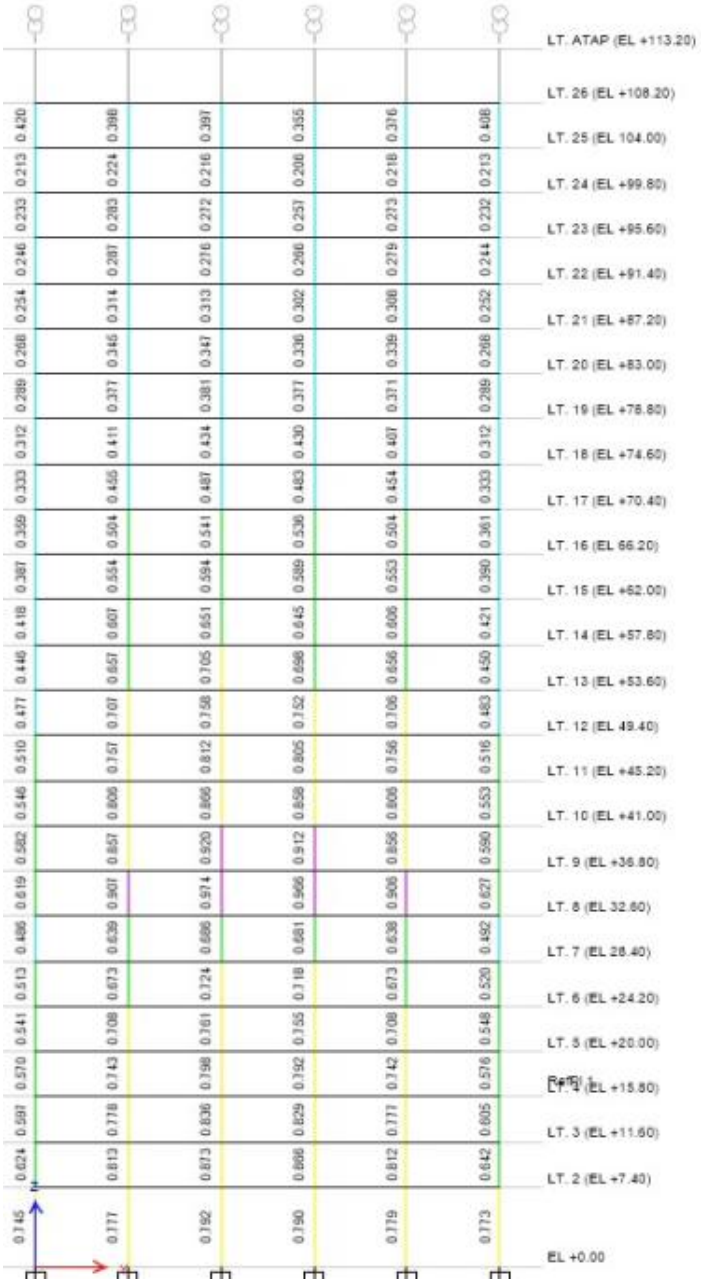
Untuk melakukan pengecekan SCWB di ETABS, terlebih dahulu kita harus mengetahui konsep *PMM Ratios*. *Column PMM Interaction Ratios* di ETABS merupakan metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas kolom beton bertulang terhadap kombinasi beban aksial (P) dan momen lentur biaxial (M2 untuk arah *major* dan M3 untuk arah minor). Rasio ini merepresentasikan perbandingan antara *demand* (beban terfaktor yang diterapkan) dengan *capacity* (kapasitas nominal kolom berdasarkan diagram interaksi PMM), yang dihitung berdasarkan permukaan interaksi tiga dimensi (*interaction surface*) untuk memastikan kolom tidak *overstressed*. Jika rasio kurang dari atau sama dengan 1, kolom dianggap aman; jika lebih dari 1, kolom dianggap *overstressed* dan memerlukan revisi desain, seperti penambahan tulangan atau peningkatan dimensi.

Fungsi utama dari PMM *Interaction Ratios* adalah sebagai alat verifikasi desain dalam modul *Concrete Frame Design* ETABS, yang sesuai dengan kode seperti ACI 318. Rasio ini dihasilkan setelah analisis struktural dan desain, di mana ETABS menghitung titik beban (P, M2, M3) relatif terhadap permukaan interaksi yang dibangun dari distribusi regangan dan tegangan material (misalnya, regangan maksimum beton 0.003 dan tegangan baja hingga fy).

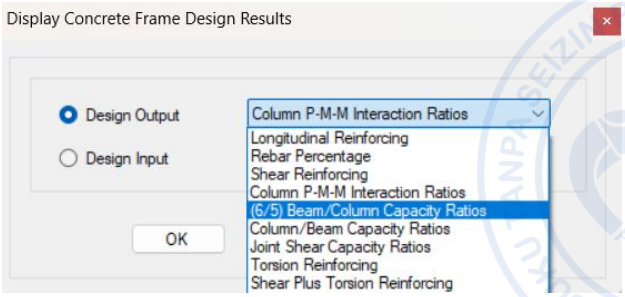
Cara mengecek rasio PMM di ETABS adalah dengan klik Shift+Ctrl+F6 → *Column P-M-M Interaction Ratios Ratio*.



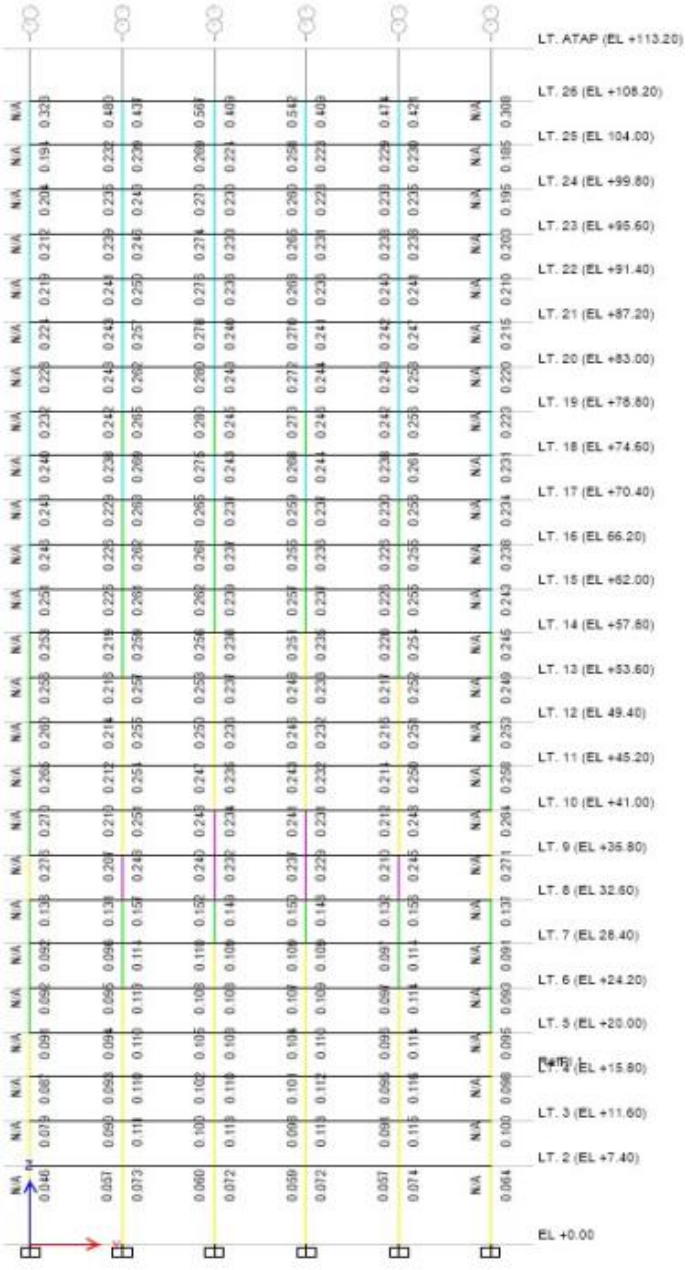
Gambar 7.19 *Column P-M-M Interaction Ratios*



Gambar 7.20 Cek *Column P-M-M Interaction Ratios* AS G2-A



Gambar 7.21 *Beam/Column Capacity Ratios*



Gambar 7.22 Cek *Beam/Column Capacity Ratios* AS G2-A

Dapat dilihat dari kedua pengecekan rasio di atas, nilai rasionya kurang dari 1, yang artinya desain kita **cukup aman**.

E. Perhitungan Kemampuan SRPMK Dalam Menanggung Minimal 25% Gaya Gempa Nominal

Portal SRPMK, atau Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus, dalam SNI 1726:2019 merupakan komponen struktural yang dirancang untuk memberikan daktilitas tinggi dalam menahan beban gempa, terutama dalam sistem ganda yang menggabungkan rangka momen dengan dinding geser atau sistem lain. Ketentuan ini memastikan bahwa rangka mampu berperan sebagai cadangan jika dinding geser mengalami kerusakan, dengan mensyaratkan rangka menanggung minimal 25% gaya gempa nominal untuk mencegah kegagalan total struktur. Persyaratan ini diterapkan pada kategori desain seismik D, E, atau F, di mana respons struktur terhadap guncangan harus dianalisis secara dinamis untuk memverifikasi distribusi gaya lateral. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan redundansi sistem, sehingga portal SRPMK tidak hanya mendukung beban gravitasi tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap ketahanan seismik keseluruhan.

Dalam sistem ganda, portal SRPMK harus didesain independen untuk menahan 25% gaya geser dasar (*base shear*) yang dihitung dari analisis statik ekuivalen atau dinamis, sesuai dengan parameter seismik situs seperti S_DS dan S_1. Persentase ini dianggap sebagai ambang minimum untuk memastikan bahwa rangka tetap berfungsi meskipun dinding geser mencapai kapasitas maksimalnya, menghindari konsentrasi deformasi pada satu sistem saja. Analisis harus mencakup efek torsi dan ketidakberaturan, dengan faktor modifikasi respons (R) untuk SRPMK biasanya 8, yang mengindikasikan tingkat daktilitas tinggi. Ketentuan ini juga memerlukan verifikasi melalui kombinasi beban seismik, di mana gaya nominal dikalikan dengan faktor *overstrength* jika diperlukan untuk elemen kritis.

Penerapan 25% gaya gempa nominal pada portal SRPMK memengaruhi pemilihan material dan dimensi elemen, seperti kolom dan balok, yang harus memenuhi persyaratan detailing dari SNI 2847:2019 untuk mencapai daktilitas yang diinginkan. Dalam praktik, perhitungan ini dilakukan setelah menentukan gaya geser dasar V dari rumus Cs W, di mana 25% V menjadi beban minimum yang dialokasikan ke rangka. Hal ini mencegah *over-reliance* pada dinding geser, yang mungkin rentan terhadap kegagalan geser atau lentur selama gempa kuat. Ketentuan ini juga diintegrasikan dengan analisis efek P-Delta untuk memastikan stabilitas vertikal tetap terjaga di bawah beban tambahan tersebut.

Untuk sistem ganda, rangka pemikul momen harus mampu memikul paling sedikit 25 % gaya seismik desain. Tahanan gaya seismik total harus disediakan oleh

kombinasi rangka pemikul momen dan dinding geser atau rangka *bresing*, dengan distribusi yang proporsional terhadap kekakuannya.

Untuk melihat berapa nilai yang ditanggung oleh kombinasi dari SRPMK dan *shear wall*, caranya adalah blok semua *joint* yang ada di lantai dasar lalu klik CTRL+T → *Joint Output* → *Reactions* → *Table: Joint Reactions.* Pada bagian *Select Load Cases* isikan hanya gaya gempa yang sudah diskalakan saja, yaitu RS-X *Scaled* dan RS-Y *Scaled*. Kemudian klik OK. Seperti biasa ekspor tabel tersebut ke Microsoft Excel lalu sortir dimulai dari RS-X *Scaled* kemudian RS-X *Scaled*. Berikut adalah rekapan persentase gaya yang ditanggung oleh dual sistem dan SRPMK saja.

Tabel 7.20
Persentasi SRPMK Minimal 25%

PERSENTASI GAYA		
STRUKTUR	X	Y
SW	70.12%	55.63%
SRPMK	29.88%	44.37%

Dapat disimpulkan dari tabel di atas bahwa persentase gaya yang ditanggung oleh Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) minimal 25% sudah terpenuhi.

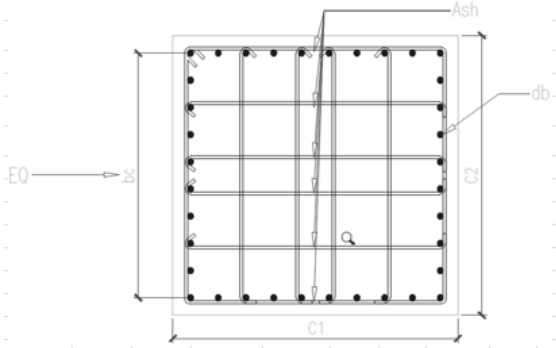
F. Perhitungan *Confinement* Kolom

Tulangan *confinement* pada kolom menurut Pasal 18.7.5 SNI 2847:2019 dirancang untuk meningkatkan daktilitas dan ketahanan terhadap beban siklik, terutama pada struktur di daerah seismik tinggi. Tulangan ini berupa sengkang atau spiral transversal yang memberikan pengikat pada inti beton kolom, mencegah *spalling* selimut beton dan *buckling* tulangan longitudinal saat deformasi besar.

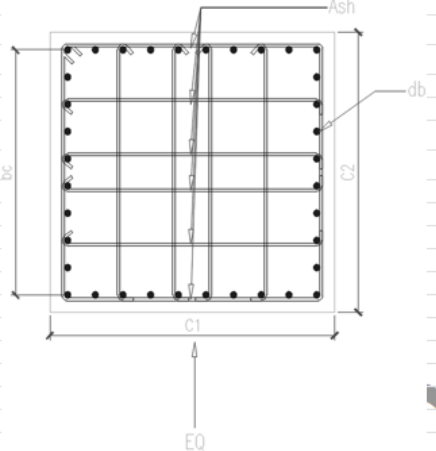
Tabel 7.22
Perhitungan Tulangan *Confinement* Kolom

PERHITUNGAN TULANGAN PENGEKANG PADA KOLOM PERSEGI SEPANJANG DAN LUAR Lo

Proyek: **KANTOR**
Bangunan: **KANTOR**



Gbr. 1 - Gempa Arah Sumbu Kuat Kolom



Gbr. 2 - Gempa Arah Sumbu Lemah Kolom

c1= Dimensi Sisi Terpanjang Kolom
c2= Dimensi Sisi Terpendek Kolom
A_g = Luas Bruto Penampang Kolom
A_{ch} = Luas Penampang Inti
f'_c = Mutu Beton
f_{yt} = Mutu Baja Tul Transversal
s = Jarak Tul Pengekang Kolom
b_c = Dimensi Penampang Inti
d_b = Dia 1 bh tul vertikal

Lo ≥ Terbesar C1 atau C2
≥ 1/6 h_{eff} kolom
≥ 450 mm

Syarat s di Lo ≤ 1/4 C2
≤ 6 db
100 mm ≤ s ≤ 150 mm

Syarat s di Luar Lo ≤ 6 db
100 mm ≤ s ≤ 150 mm

Syarat Luas Tulangan Pengekang :

1. $A_{sh1} = 0.3 \frac{s\, b_c f_c}{f_{yt}} \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}}\right) - 1\right]$ Tabel 18.7.5.4 SNI 2847:2019

2. $A_{sh2} = 0.09 \frac{s\, b_c f_c}{f_{yt}}$ Tabel 18.7.5.4 SNI 2847:2019

Type Kolom	Penampang		A_g	A_{ch}	f'_c	f_{yt}	L_o			Luar L_o		Arah Sumbu Kuat Kolom								Arah Sumbu Lemah Kolom							
	C_1	C_2					L	s	cek	s	cek	b_c	A_{sh1}	A_{sh2}	Tulangan Pengekang					b_c	A_{sh1}	A_{sh2}	Tulangan Pengekang			
															Jumlah	Dia.		$A_{sh(used)}$					Jumlah	Dia.		$A_{sh(used)}$	
	mm	mm	cm²	cm²	Mpa	Mpa	mm	mm		mm		mm	mm²	mm²	bundel	bh	mm	mm²		mm	mm²	mm²	bundel	bh	mm	mm²	
K1212	1,200	1,200	14,400	12,544	30	420	1,200	100	OK	100	OK	1,120	355	720	1	6	13	796	OK	1,120	355.10	720.00	1	6	13	795.99	OK

BAB 8

PENULANGAN DINDING GESER

A. Pengecekan Awal

Pengecekan awal dinding geser dalam SNI 1726:2019 merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa elemen ini dapat berfungsi sebagai sistem penahan gaya lateral utama selama kejadian gempa, sesuai dengan desain seismik yang ditentukan. Proses ini melibatkan evaluasi awal terhadap dimensi, kekakuan, dan kapasitas dinding geser untuk menahan gaya geser dasar yang dihitung dari analisis statik ekuivalen atau dinamis. Ketentuan ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa dinding geser mampu mendistribusikan gaya lateral ke fondasi tanpa mengalami kegagalan sebelum elemen lain, terutama pada kategori desain seismik D, E, atau F, di mana beban gempa lebih signifikan. Pengecekan awal juga mempertimbangkan efek torsio dan ketidakberaturan untuk memastikan stabilitas keseluruhan struktur.

Langkah awal pengecekan meliputi perhitungan gaya geser dasar (V) menggunakan rumus Cs W, di mana Cs adalah koefisien respons seismik dan W adalah berat efektif struktur. Dinding geser harus dirancang untuk menahan sebagian besar gaya ini, dengan verifikasi bahwa total kekuatan geser dinding tidak kurang dari nilai yang dihasilkan analisis. Ketentuan ini juga mensyaratkan evaluasi eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekakuan untuk menentukan kebutuhan analisis torsi tambahan, yang dapat memengaruhi distribusi gaya pada dinding geser. Pengecekan ini dilakukan sebelum detailing akhir untuk menghindari revisi besar pada tahap desain lanjutan.

Implikasi dari pengecekan awal adalah identifikasi potensi kelemahan dini, seperti kekakuan yang tidak merata atau kapasitas geser yang kurang, yang dapat diatasi dengan penyesuaian desain. Ketentuan ini mendukung performa dinding geser dalam sistem ganda, di mana dinding harus bekerja bersama rangka pemikul momen khusus (SRPMK) yang menanggung minimal 25% gaya gempa nominal. Pengecekan ini juga memastikan bahwa dinding geser tetap elastis atau mengalami deformasi terkontrol untuk mencapai level performa *Immediate Occupancy* pasca-gempa.

B. Pengecekan Kebutuhan *Boundary Element* Dengan *Simplify* (C&T)

Pengecekan kebutuhan *boundary element* dengan metode *Simplify* (*Compression and Tension*) dalam SNI 1726:2019 merupakan prosedur awal untuk menentukan apakah dinding geser memerlukan penguatan tambahan di ujung-ujungnya untuk menahan tekanan dan tarik akibat beban gempa. *Boundary element* adalah daerah di tepi dinding geser yang diberi tulangan longitudinal dan transversal tambahan untuk meningkatkan daktilitas dan mencegah kegagalan akibat kompresi atau tegangan ekstrem.

Tabel 8.1
Lokasi *Boundary Element* pada *Shear Wall*

Story	Pier Label	Pier Section	Thickness	Compressive Stress Left	Compressive Stress Right	Compressive Stress Limit Left	Compressive Stress Limit Right	C Depth	Boundary Zone	Boundary Pakai
			mm	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	
LT. 2 (EL +7.40)	P3	SW1A	400	2.29	3.43	6	6			terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P3	SW1A	400	2.31	4.72	6	6	974.1	487	terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P4	SW1A	400	2.79	2.96	6	6			terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P4	SW1A	400	4.78	3.42	6	6	975.4	487.7	terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P5	SW1A	400	2.26	3.49	6	6			terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P5	SW1A	400	2.29	4.75	6	6	975.6	487.8	terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P6	SW1A	400	2.79	2.97	6	6			terletak pada kolom
LT. 2 (EL +7.40)	P6	SW1A	400	4.72	3.42	6	6	975.6	487.8	terletak pada kolom
LT. 8 (EL 32.60)	P3	SW1B	400	2.56	3.8	6	6			terletak pada kolom
LT. 7 (EL 28.40)	P3	SW1B	400	2.69	4.57	6	6	1117	558.5	terletak pada kolom
LT. 6 (EL +24.20)	P3	SW1B	400	2.8	4.87	6	6	1163.4	581.7	terletak pada kolom
LT. 5 (EL +20.00)	P3	SW1B	400	4.52	4.51	6	6	1238.9	619.4	terletak pada kolom
LT. 4 (EL +15.80)	P3	SW1B	400	4.8	4.7	6	6	1280.9	640.5	terletak pada kolom
LT. 3 (EL +11.60)	P3	SW1B	400	5.1	4.94	6	6	1327.4	663.7	terletak pada kolom
LT. 26 (EL +108.20)	P3	SW1C	400	0.02	0.2	6	6			terletak pada kolom
LT. 25 (EL 104.00)	P3	SW1C	400	0.15	0.41	6	6			terletak pada kolom
LT. 24 (EL +99.80)	P3	SW1C	400	0.33	0.62	6	6			terletak pada kolom
LT. 23 (EL +95.60)	P3	SW1C	400	0.5	0.84	6	6			terletak pada kolom
LT. 22 (EL +91.40)	P3	SW1C	400	0.68	1.05	6	6			terletak pada kolom
LT. 21 (EL +87.20)	P3	SW1C	400	0.85	1.28	6	6			terletak pada kolom
LT. 20 (EL +83.00)	P3	SW1C	400	1.02	1.5	6	6			terletak pada kolom
LT. 19 (EL +78.80)	P3	SW1C	400	1.19	1.73	6	6			terletak pada kolom
LT. 18 (EL +74.60)	P3	SW1C	400	1.36	1.95	6	6			terletak pada kolom
LT. 17 (EL +70.40)	P3	SW1C	400	1.53	2.19	6	6			terletak pada kolom
LT. 16 (EL 66.20)	P3	SW1C	400	1.69	2.42	6	6			terletak pada kolom
LT. 15 (EL +62.00)	P3	SW1C	400	1.86	2.66	6	6			terletak pada kolom
LT. 14 (EL +57.80)	P3	SW1C	400	2.01	2.9	6	6			terletak pada kolom
LT. 13 (EL +53.60)	P3	SW1C	400	2.17	3.14	6	6			terletak pada kolom
LT. 12 (EL 49.40)	P3	SW1C	400	2.32	3.38	6	6			terletak pada kolom
LT. 11 (EL +45.20)	P3	SW1C	400	2.46	3.63	6	6			terletak pada kolom
LT. 10 (EL +41.00)	P3	SW1C	400	2.61	3.88	6	6			terletak pada kolom
LT. 9 (EL +36.80)	P3	SW1C	400	2.74	4.69	6	6	1247	623.5	terletak pada kolom

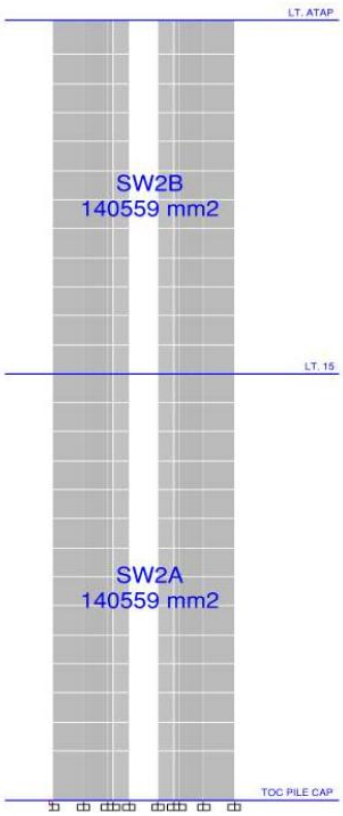
Tabel 8.2
Panjang *Boundary Element* pada *Shear Wall*

Pengecekan Kebutuhan Elemen Batas Khusus					
Displacement-Based Method					
Panjang Zona Tekan, c	21.9.6.4	18.10.6.4	Input (nilai terbesar)	mm	1251
δ_u			Input (boleh dikosongkan)	mm	
δ_u / h_w	21.9.6.2 (0.007)	18.10.6.2 (0.005)	max (δ_u / h_w; 0.005)		0.005
Perlu Elemen Batas Khusus?	21.9.6.2 (δ_u)	18.10.6.2 (1.5 δ_u)	c >= L_w / [600 * (1.5 δ_u / h_w)]		Tidak Perlu
c - 0.1 L_w	21.9.6.4	18.10.6.4		mm	331
c/2	21.9.6.4	18.10.6.4		mm	625.5
h_c + 300	21.9.6.4	18.10.6.4		mm	1500
Panjang Elemen Batas Khusus, L_{BE}	21.9.6.4	18.10.6.4	max (c - 0.1 L_w; c/2; h_c + 300)	mm	1500
$M_u / (4 V_u)$				mm	8844.137
Tinggi Elemen Batas Khusus, h_{BE}	21.9.6.2	18.10.6.2	max (L_w; M_u / 4V_u)	mm	9200

MEMPERBANYAK BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT • DILARANG
Pusaka

C. Desain Tulangan Lentur

Desain tulangan lentur pada *shear wall* menurut SNI 2847:2019 difokuskan pada kemampuan dinding untuk menahan momen lentur akibat beban lateral seperti gempa, di mana tulangan vertikal berfungsi sebagai tulangan utama untuk fleksural. Pada desain umum, *shear wall* diperlakukan sebagai elemen tekan dengan momen, sehingga perhitungan kekuatan lentur mengikuti persyaratan untuk anggota tekan pada Pasal 22.4, dengan rasio tulangan minimum vertikal sebesar 0,0012 untuk tulangan ulir deformasi (Pasal 11.6.1). Untuk memastikan daktilitas, tulangan lentur harus dirancang agar kekuatan nominal Mn tidak kurang dari kekuatan yang dibutuhkan Mu, dengan pertimbangan interaksi aksial-lentur menggunakan diagram interaksi.

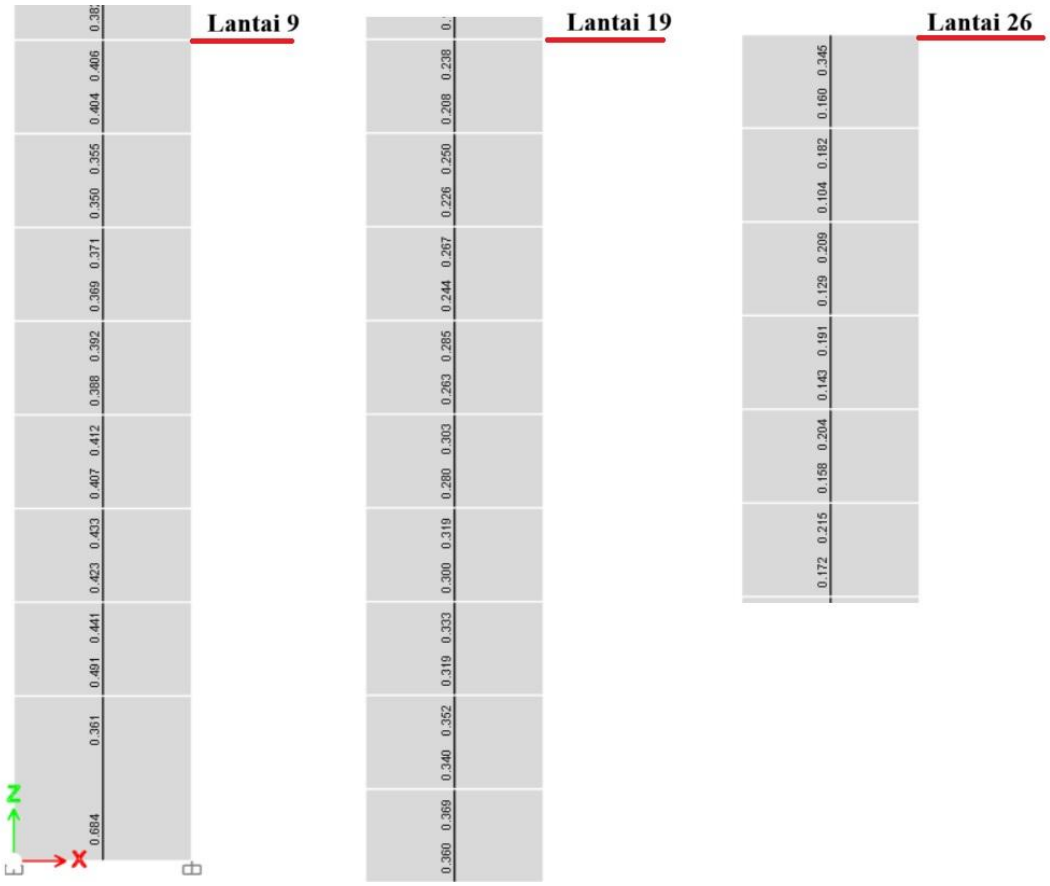


Gambar 8.1 Kebutuhan Luas Tulangan Lentur *Shear Wall*

Untuk menampilkan nilai luas tulangan perlu seperti gambar di atas pada *software* ETABS, caranya klik Shift+F10 dan biarkan sampai analisis *shear wall* selesai dilakukan → Shift+Ctrl+F10 → *Design Output* → *Pier Longitudinal Reinforcing*.

D. Pengecekan D/C *Ratios*

D/C *ratio* (*Demand/Capacity ratio*) untuk *shear wall* (dinding geser) adalah rasio antara permintaan beban (*demand*, seperti gaya geser Vu, momen Mu, aksial Pu) dari analisis struktur terhadap kapasitas desain (*capacity*, seperti φVn untuk geser, φMn untuk fleksural) elemen tersebut. Pengecekan ini memastikan *shear wall* aman terhadap beban gempa dan gravitasi, dengan D/C ≤ 1.0 sebagai batas keamanan (jika >1.0, elemen *overstressed* dan perlu revisi). Di ETABS (versi 18+ direkomendasikan), *shear wall* dimodelkan sebagai *shell elements* atau *pier/spandrel*, dan pengecekan dilakukan melalui modul *Concrete Shell Design* atau *Shear Wall Design*, yang mendukung kode mirip ACI 318-14 (basis SNI 2847:2019).



Gambar 8.2 *D/C Ratios Shear Wall*

Untuk mengetahui berapa nilai D/C *ratio* pada *shear wall* seperti yang ditunjukkan gambar di atas, caranya klik Shift+F10 dan biarkan sampai analisis *shear wall* selesai dilakukan → Shift+Ctrl+F10 → *Design Output* → *Pier D/C Ratios* → *OK*. Hasilnya terlihat seperti gambar di bawah.

Dapat dilihat dari gambar di atas bahwa semua angka pada D/C *ratios shear wall* nilainya di bawah 1, yang berarti desain *shear wall* pada struktur gedung kantor 26 lantai ini **aman untuk digunakan**.

E. Desain Tulangan Geser Pada *Shear Wall*

Desain tulangan geser (*shear reinforcement*) pada *shear wall* (dinding geser) bertujuan untuk memastikan dinding dapat menahan gaya geser (Vu atau Ve untuk *seismic*) yang timbul dari beban gravitasi dan gempa, sambil memenuhi persyaratan ketahanan, daktilitas, dan detailing. Proses desain menggabungkan SNI 1726:2019 untuk menentukan *demand* beban gempa (termasuk *amplified shear force*) dengan SNI 2847:2019 untuk menghitung kapasitas geser (Vn = Vc + Vs) dan kebutuhan tulangan. SNI 2847:2019 merupakan adaptasi dari ACI 318-14, sehingga rumus dan pasal mirip, dengan fokus pada *Load Resistance Force Design* (LRFD). Tulangan geser biasanya berupa tulangan horizontal (transversal) dalam dua lapis, dengan rasio minimal $\rho_t = 0.0025$, dan *amplified* untuk zona *seismic* tinggi agar kegagalan daktil. (fleksural sebelum geser).

Untuk mengetahui berapa nilai luas tulangan geser yang diperlukan pada ETABS, caranya Shift+Ctrl+F10 → *Design Output* → *Pier Shear Reinforcing* → *OK*.

F. Desain Tulangan Pengekang Pada *Shear Wall*

Tulangan pengekang (*confinement reinforcement*) pada *shear wall* atau dinding geser merupakan elemen penting dalam desain struktur beton bertulang untuk meningkatkan daktilitas dan ketahanan terhadap beban gempa. Menurut SNI 2847:2019, tulangan pengekang biasanya berupa *hoop ties* atau sengkang tertutup yang ditempatkan di elemen batas khusus (*special boundary elements*) pada ujung dinding geser, bertujuan untuk mencegah kegagalan tekan *brittle* dan memastikan deformasi plastis terkendali. Desain ini terintegrasi dengan SNI 1726:2019, yang mengatur *demand* beban gempa melalui analisis dinamik dan faktor amplifikasi, sehingga tulangan pengekang harus dirancang untuk menahan gaya geser *amplified* (Ve) agar kegagalan terjadi secara *ductile*. Proses desain melibatkan penentuan spasi tulangan, diameter, dan pengaitan untuk memenuhi persyaratan *confinement* mirip kolom *seismic*, dengan asumsi regangan tekan melebihi 0.003 memerlukan pengekang tambahan.

Dalam SNI 2847:2019, desain tulangan pengekang secara rinci diatur untuk dinding geser khusus, di mana tulangan pengekang harus menggunakan *hoop ties* dengan sudut pengaitan 135° atau 180°, dan spasi (s) tidak boleh melebihi 1/3 dimensi terkecil elemen batas atau 100 mm di zona engsel plastik. Persyaratan ini memastikan volume tulangan pengekang (ρ_s) memenuhi rumus minimum untuk *confinement*,

seperti ρs ≥ 0.09 f'c / fy untuk spiral atau *hoop*, dengan penambahan tulangan transversal jika selimut beton >100 mm. Tulangan pengekang diperlukan jika tegangan tekan > 0.2*f'c atau regangan > 0.003, dan panjangnya minimal max(c, 0.1*lw) di mana c adalah zona tekan. Bukti tertulis ada di Pasal 18.10.6.4 untuk detailing *confinement*, Pasal 18.10.6.3 untuk dimensi elemen batas, dan Pasal 18.7.5.4 (Tabel 18.7.5.4) untuk rumus tulangan transversal yang diterapkan pada *boundary elements shear wall*.

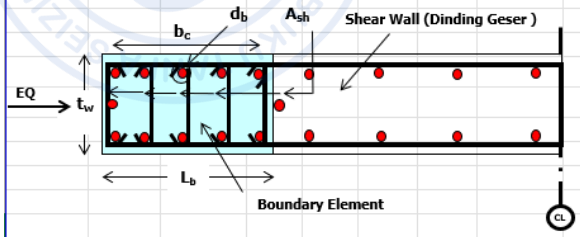
Tabel 8.3

Hasil Perhitungan Tulangan Pengekang pada *Shear Wall*

PERHITUNGAN TULANGAN PENGEKANG BOUNDARY ELEMENT DINDING GESER

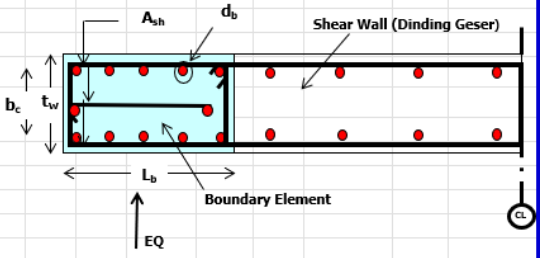
Proyek: BPAD

Bangunan: KANTOR



Gbr. 1 - Gempa Searah Dinding

L_b = Panjang Boundary Element
t_w = Tebal Boundary Element
f'_c = Mutu Beton
f_y = Mutu Baja Tul Vertikal
f_{yt} = Mutu Baja Tul Transversal
s = Jarak Tul Pengekang Boundary Element
b_c = Dimensi Penampang Inti
d_b = Dia 1 bh tul vertikal
A_b = Luas 1 bh tul vertikal



Gbr. 2 - Gempa Tegak Lurus Dinding

Syarat Luas Tulangan Pengekang :

$$A_{sh} = 0.09 \frac{s\, b_c f_c}{f_{yt}}$$

Tabel 18.10.6.4
SNI 2847:2019

Syarat s max.
- ≤ 1/3 b_c terkecil
- ≤ 6 db
- 100 mm ≤ s ≤ 150 mm

Page 1

Type SW	Pier Label	Penampang		f'_c	f_{yt}	s	cek s_{used}	Arah Sejajar Dinding Geser							Arah Tegak Lurus Dinding Geser							Tul. Pengekang Yg Dipakai	
		L_b	t_w					b_c	A_{sh}	Bundel	Tulangan Pengekang				b_c	A_{sh}	Bundel	Tulangan Pengekang				Arah	Arah
											Jlh.	Dia.	$A_{sh(used)}$					Jlh.	Dia.	$A_{sh(used)}$			
		mm	mm	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	mm²	bh	bh	mm	mm²		mm	mm²	bh	bh	mm	mm²		Sejajar	Tegak Lurus
SW1	WALL 1	1,500	400	30	420	100	OK	1,440	925.71	1	11	13	1,459.32	OK	340	218.57	1	2	13	265.33	OK	1 x 11 D13-100	1 x 2 D13-100
	WALL 1	1,500	400	30	420	100	OK	1,440	925.71	1	8	13	1,061.32	OK	340	218.57	1	2	13	265.33	OK	1 x 8 D13-100	1 x 2 D13-100

G. Pengecekan Pada Taraf Penjepitan (Rasio Runtuh Geser dan Lentur)

Rasio keruntuhan geser dan lentur pada *shear wall* menurut SNI 2847:2019 merujuk pada klasifikasi mode kegagalan berdasarkan aspek rasio dinding (hw/lw), di mana hw adalah tinggi dinding dan lw adalah panjang dinding. Jika rasio hw/lw kurang dari 2, dinding cenderung mengalami keruntuhan geser (*shear-dominated failure*) yang bersifat *brittle*, karena gaya lateral lebih banyak ditahan oleh kekuatan geser daripada momen lentur. Sebaliknya, jika rasio hw/lw lebih besar atau sama dengan 2, dinding diklasifikasikan sebagai dinding langsing atau *flexural wall*, di mana keruntuhan cenderung lentur (*flexural-dominated failure*) yang lebih *ductile*, memungkinkan deformasi besar sebelum runtuh. Klasifikasi ini penting untuk menentukan pendekatan desain agar struktur tetap aman di daerah seismik.

Untuk membuktikan keberadaan ketentuan ini, rasio keruntuhan geser dan lentur dibahas dalam Pasal 18.10 SNI 2847:2019, khususnya subpasal 18.10.1 hingga 18.10.4 yang mengatur klasifikasi dinding berdasarkan aspek rasio dan kekuatan geser. Pasal ini menjelaskan bagaimana rasio hw/lw menentukan apakah dinding lebih rentan geser atau lentur, serta cara menghitung Ve untuk memprioritaskan mode lentur. Selain itu, Pasal 11.5 dan 11.6 melengkapi untuk desain umum nonseismik, tetapi fokus seismik ada di Pasal 18.

Untuk mengetahui apakah desain dinding geser ini termasuk tipe keruntuhan geser ataupun *flexural wall*, terlebih dahulu harus mengetahui rasio antara hw/lw dari *shear wall* tersebut. Di bawah ini adalah hasil rasio geser dan lentur.

Tabel 8.4

Hasil Perhitungan Rasio Runtuh Geser dan Lentur pada *Shear Wall*

PENGECEKAN DINDING GESER (Pengecekan Keruntuhan Lentur Terlebih Dahulu Dari Keruntuhan Geser)

PENGECEKAN RATIO GESER $V_{U\ RENCANA}$ (TERPASANG) DENGAN $V_{U\ PERLU}$ (ANALISIS)

$$V_n = A_{CV}\left(\alpha_c \lambda \sqrt{f_c'} + \rho_t f_y\right)$$ *SNI-03-2847-2019 (Pasal 18.10.4.1)*

V_n = Kuat Geser Nominal

α = 1/4 untuk (h_w/λ_w) ≤ 1.5

α = 1/6 untuk (h_w/λ_w) ≥ 2.0

h_w = tinggi dinding

l_w = panjang dinding dlm arah geser

t_w = tebal dinding

A_{cv} = luas bruto penampang

ρ_n = ratio penulangan geser

f'_c = mutu beton

f_y = mutu tul. Geser

Ø = 0.75 faktor reduksi untuk geser

Hasil ETABS

No.	UKURAN									Kekuatan Geser Rencana					Rencana	Design		
	t_w	h_w	λ_w	h_w/λ_w	α	A_{cv}	f'_c	f_y	Tul.Geser (Terpasang)	ρ_n	V_n	$V_{n\ max}$ $2/3\ A_{cv}\ f_c^{1/2}$	Ø	V_u Ø V_n	(Kuat Rencana) $V_{u(Rencana)}$	(Kuat Perlu) $V_{u(Design)}$	Ratio Geser	Ket.
	(mm)	(mm)	(mm)			(mm²)	(Mpa)	(Mpa)			(KN)	(KN)		(KN)	(Ton)	(Ton)		
SW1	400	7,400	9,400	0.79	0.25	3,760,000.00	30	420	D 19 - 250	0.005668	5,148.59	13,729.58	0.75	3,861.45	386.14	311.9	1.24	OK

PENGECEKAN RATIO GESER TERHADAP RATIO LENTUR

h_w = tinggi dinding

lw = panjang dinding dlm arah geser

t_w = tebal dinding

Hasil ETABS

Dari Diagram Interaksi Berdasarkan Pu Analisis

No.	UKURAN			Design		Rencana					
	t_w	h_w	λ_w	Pu	Mu (Kuat Perlu) $M_{u(Design)}$	Mu (Kuat Rencana) $M_{u(Rencana)}$	Ratio Lentur	Ratio Geser	Ratio Geser/Lentur > 1.0	Ket.
	(mm)	(mm)	(mm)	(Ton)	(Ton-M)	(Ton-M)				
SW1	400	7,400	9,400	3,104.00	5,126.00	6,054.00	1.18	1.24	1.05	OK

Page 1
Page 2

DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 318. 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318M-14). Michigan: American Concrete Institute.

American Society of Civil Engineers. 2000. FEMA 356: Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings. Washington D.C.: ASCE

American Society of Civil Engineers. 2016. *ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.* United States of America: ASCE.

Badan Standarisasi Nasional. 2019. *SNI 1726-2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Badan Standarisasi Nasional. 2019. *SNI 2847-2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

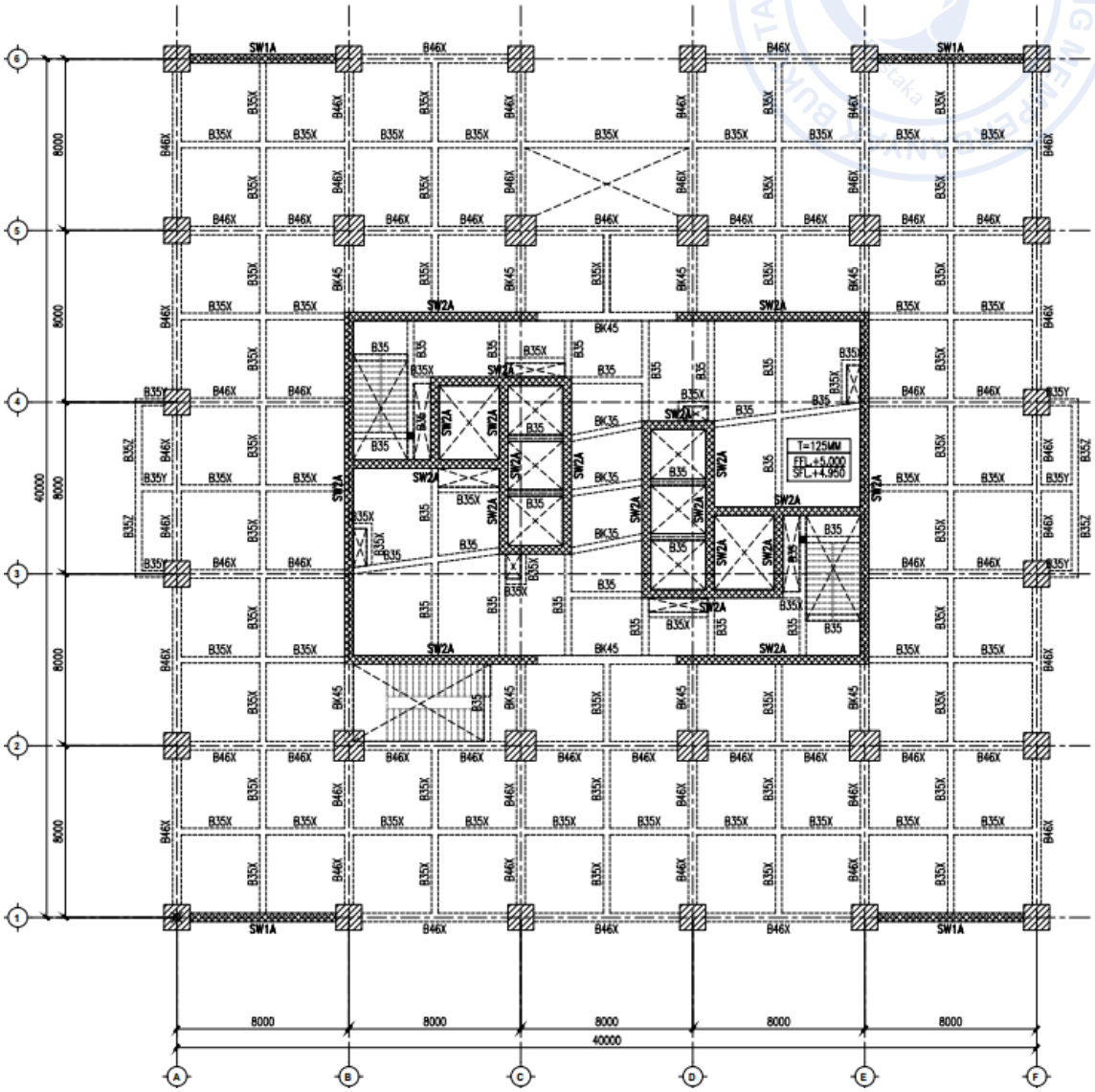
Badan Standarisasi Nasional. 2020. *SNI 1727-2020: Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

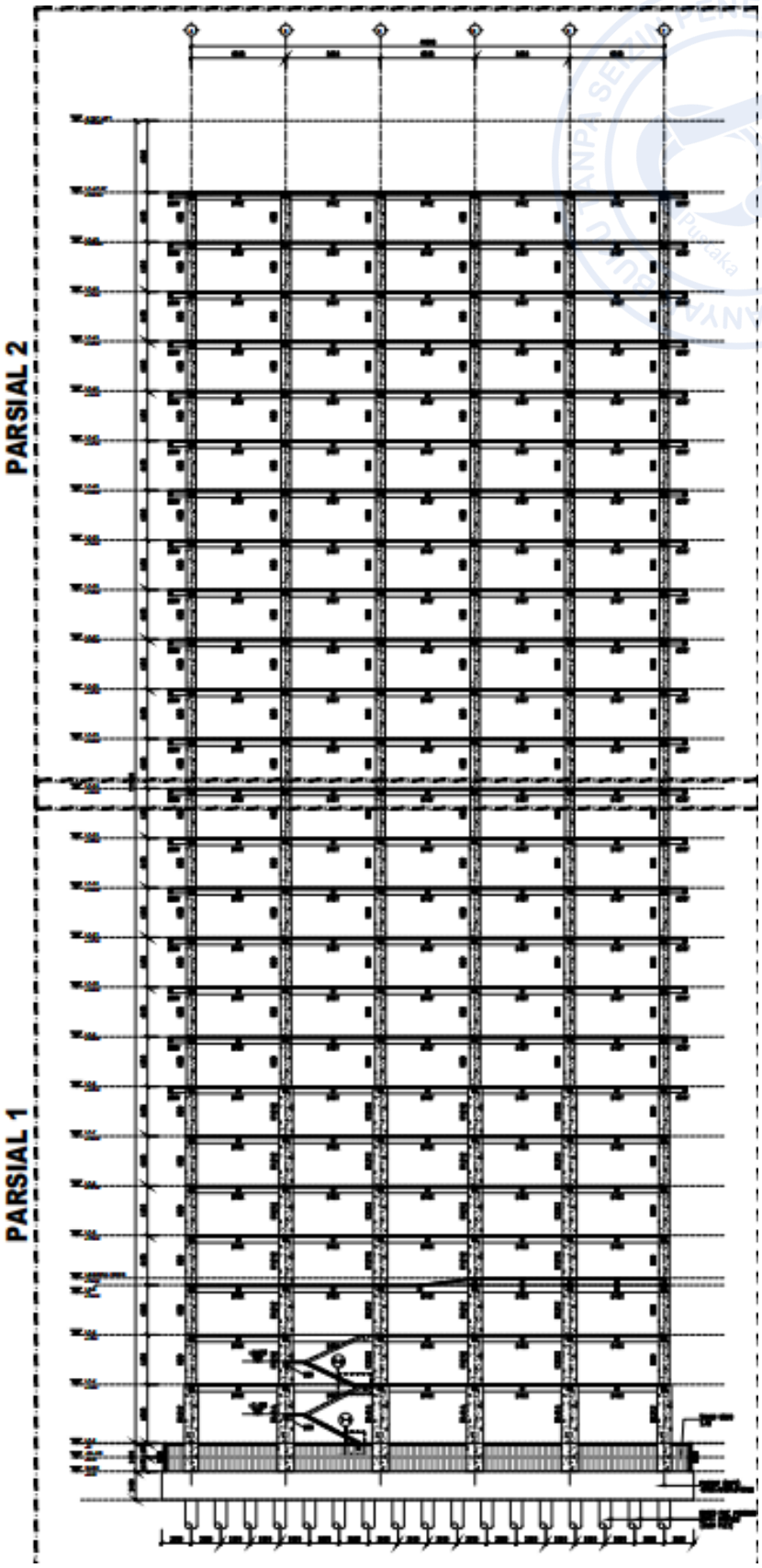
Badan Standarisasi Nasional. 2020. *SNI 7860-2020: Ketentuan Seismik Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

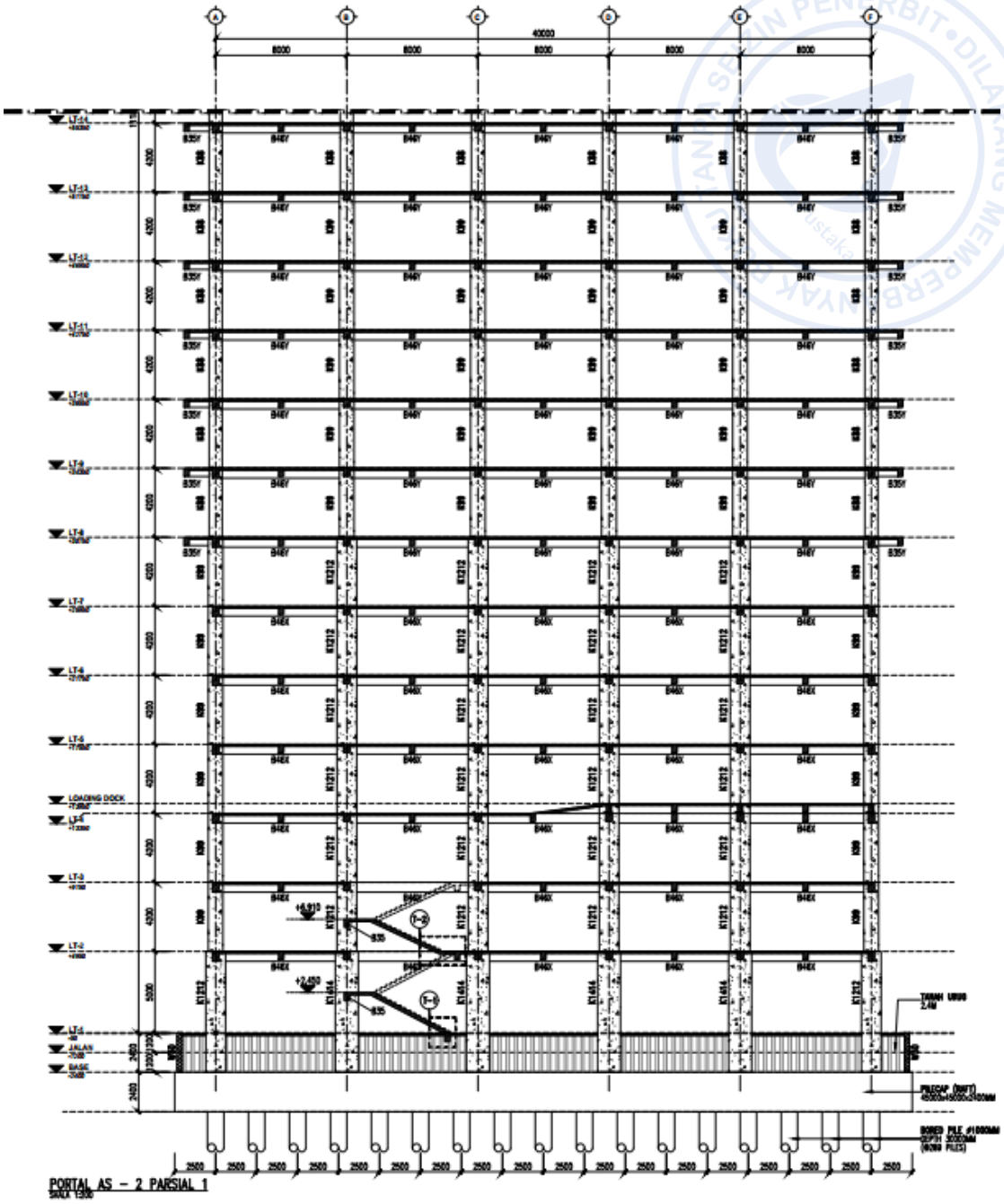
Direktorat Jenderal Cipta Karya. 2021. *Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021*. Diakses pada 25 November 2023, dari http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/

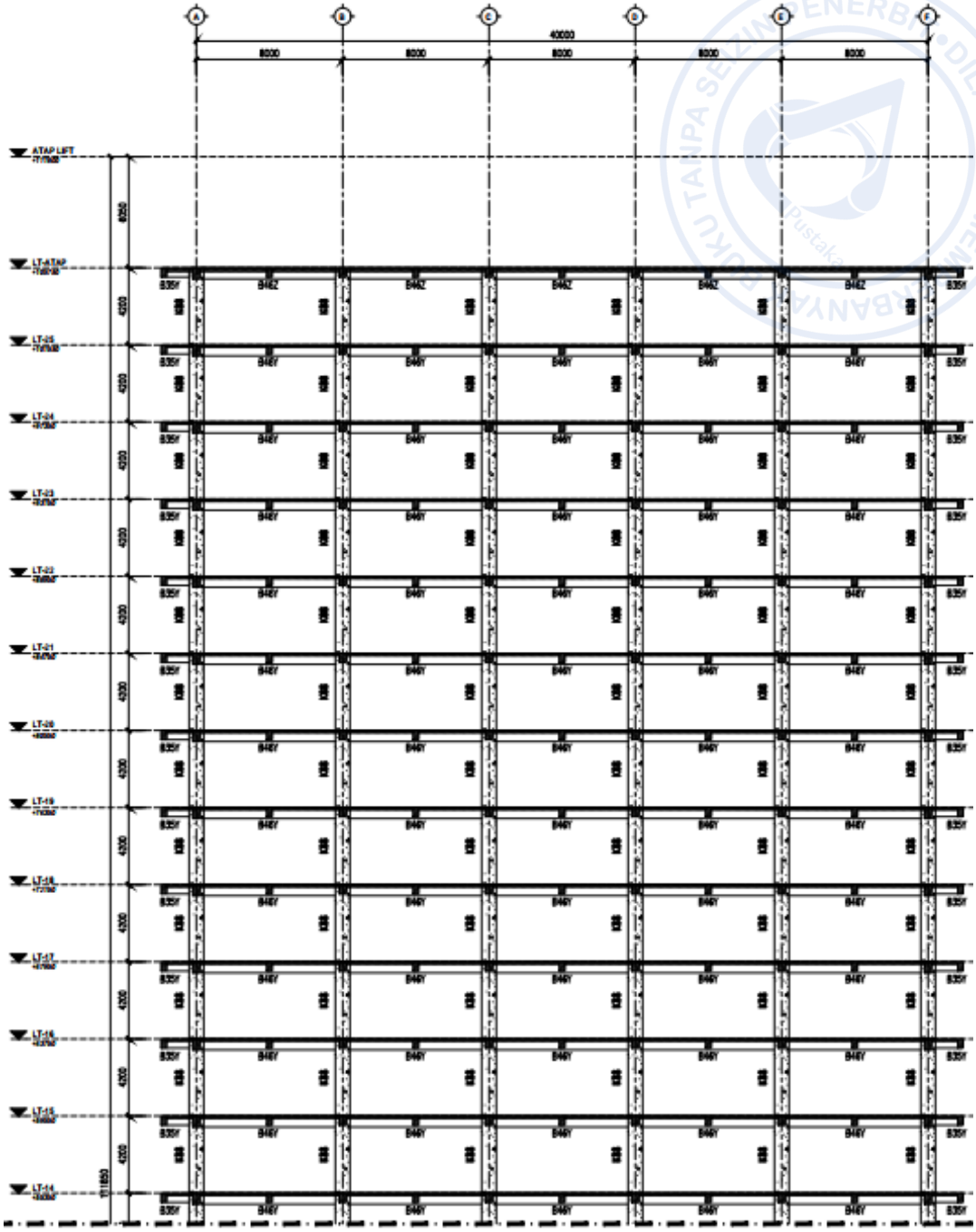
Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta: Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman.

LAMPIRAN

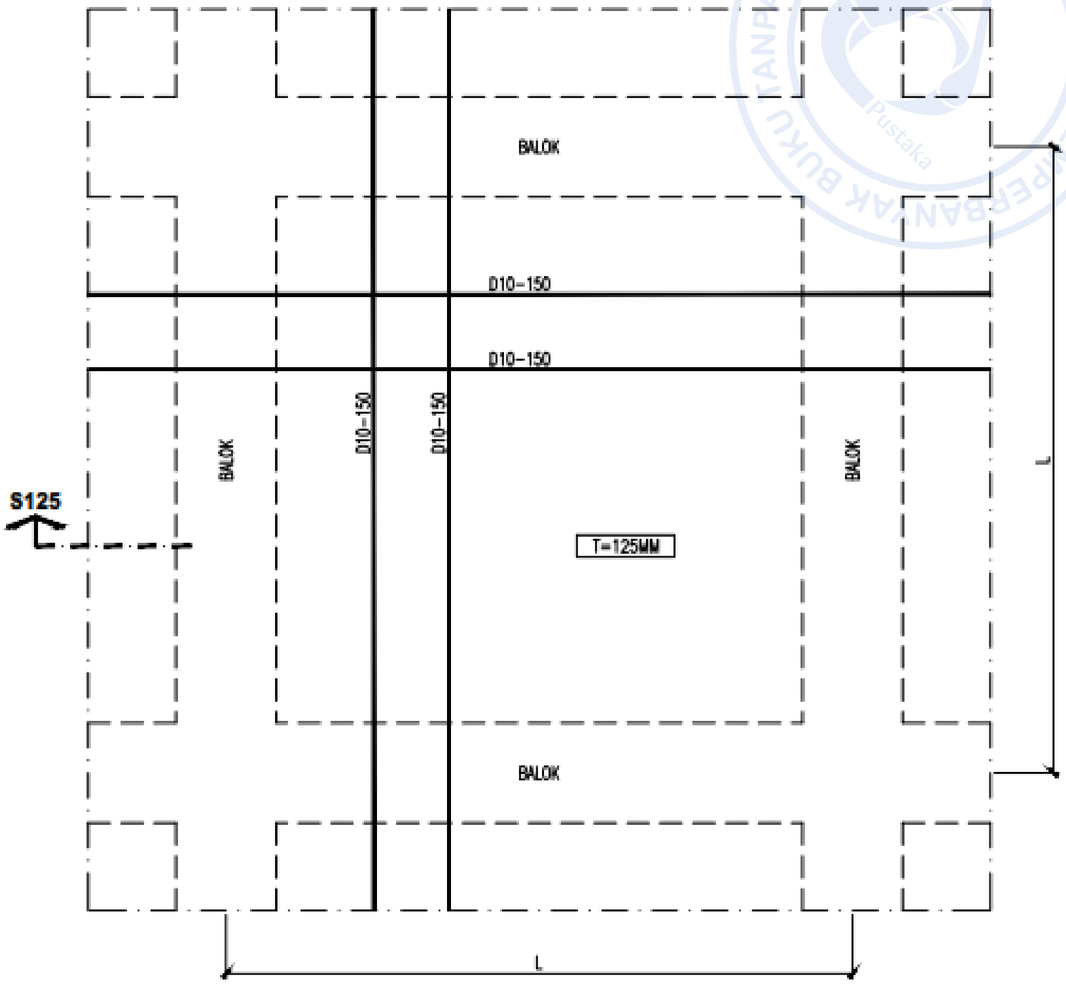

SW1A
SW2A
B46X
B35X
BK45
B35
T=125MM
FFL.+5.000
SFL.+4.950
8000
40000
A
B
C
D
E
F


PARSIAL 2
PARSIAL 1

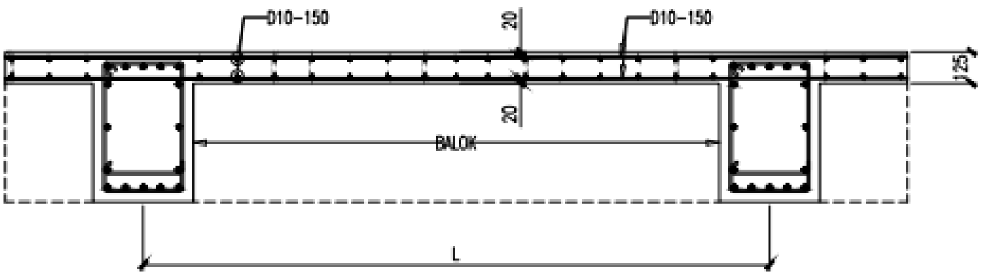

PORTAL AS – 2 PARSIAL 1



PORTAL AS – 2 PARSIAL 2

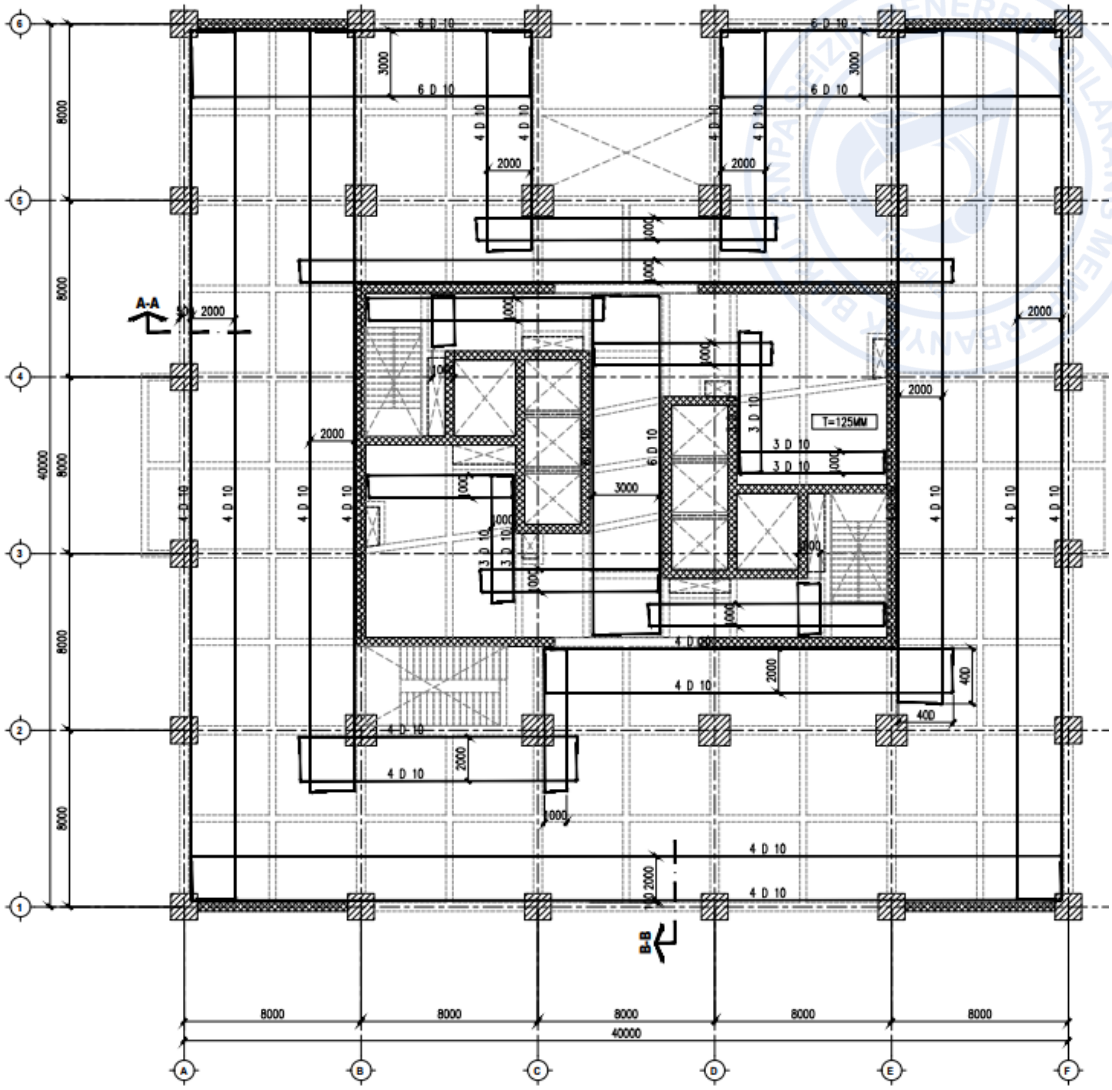


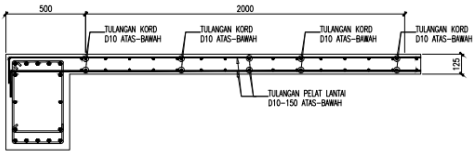
DETAIL PELAT LANTAI T=125MM
SKALA 1:20



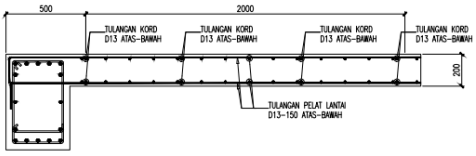
POTONGAN S125
SKALA 1:20

BUKU TANPA SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK
Pustaka

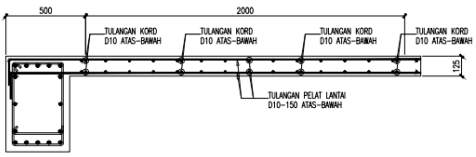




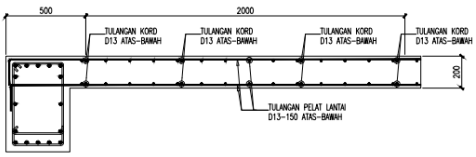
POTONGAN A-A (TIPIKAL)
SKALA 1:15



POTONGAN C-C (TIPIKAL)
SKALA 1:15

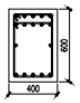
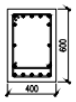


POTONGAN B-B (TIPIKAL)
SKALA 1:15

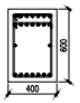
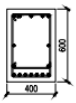


POTONGAN D-D (TIPIKAL)
SKALA 1:15

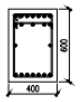
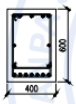
BALOK

TIPE BALOK	B46X–(400x600) LT–1 ~ LT–7	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	10 D 25	5 D 25
TUL–BAWAH	5 D 25	7 D 25
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B46Y–(400x600) LT–7 ~ LT–25	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	14 D 19	5 D 19
TUL–BAWAH	7 D 19	9 D 19
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B46Z–(400x600) LT–ATAP	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	12 D 19	5 D 19
TUL–BAWAH	7 D 19	9 D 19
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B35–(300x500)	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	6 D 22	3 D 22
TUL–BAWAH	3 D 22	6 D 22
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B35X–(300x500)	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	6 D 19	3 D 19
TUL–BAWAH	3 D 19	6 D 19
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B35Y–(300x500) KANTILEVER	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	5 D 19	3 D 19
TUL–BAWAH	3 D 19	3 D 19
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–200	D13–200
SELIMUT	40MM	

BALOK

TIPE BALOK	B35Z–(300x500)	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	6 D 16	3 D 16
TUL–BAWAH	3 D 16	6 D 16
TUL–PINGGANG	2 D 13	2 D 13
SENGKANG	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

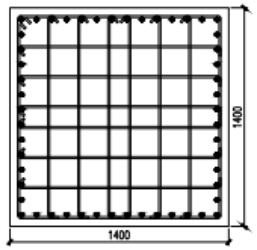
BALOK

TIPE BALOK	B24–(200x400) BALOK BORDES	
POTONGAN		
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
TUL–ATAS	3 D 13	3 D 13
TUL–BAWAH	3 D 13	3 D 13
TUL–PINGGANG	–	–
SENGKANG	D10–100	D10–150
SELIMUT	40MM	

TABEL PENULANGAN BALOK
SKALA 1:20

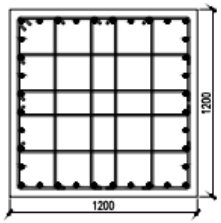
Activa

KOLOM

TIPE KOLOM	K1414
	● 50 D 32
POTONGAN	

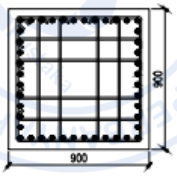
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13–100	D13–150
CROSSTIES (X)	D13–100	D13–150
CROSSTIES (Y)	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

KOLOM

TIPE KOLOM	K1212
	● 36 D 32
POTONGAN	

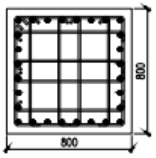
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13–100	D13–150
CROSSTIES (X)	D13–100	D13–150
CROSSTIES (Y)	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

KOLOM

TIPE KOLOM	K99
	● 44 D 25
POTONGAN	

POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13–100	D13–150
CROSSTIES (X)	D13–100	D13–150
CROSSTIES (Y)	D13–100	D13–150
SELIMUT	40MM	

KOLOM

TIPE KOLOM	K88
	● 28 D 19
POTONGAN	

POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13–100	D13–110
CROSSTIES (X)	D13–100	D13–110
CROSSTIES (Y)	D13–100	D13–110
SELIMUT	40MM	

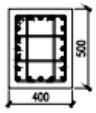
KOLOM

TIPE KOLOM	K33 (KOLOM BORDES)
	● 8 D 13
POTONGAN	

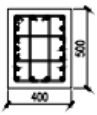
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D10–100	D10–150
CROSSTIES (X)	D10–100	D10–150
CROSSTIES (Y)	D10–100	D10–150
SELIMUT	40MM	

TABEL PENULANGAN KOLOM
SKALA 1:20

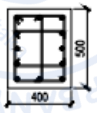
BALOK KOLEKTOR

TIPE BALOK	BK45 (LT-2 ~ LT-5)	
POTONGAN	⬢20 D 25 	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13-100	D13-150
CROSSTIES (X)	D13-100	D13-150
CROSSTIES (Y)	D13-100	D13-150
SELIMUT	40MM	

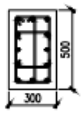
BALOK KOLEKTOR

TIPE BALOK	BK45 (LT-6 ~ LT-15)	
POTONGAN	⬢16 D 25 	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13-100	D13-150
CROSSTIES (X)	D13-100	D13-150
CROSSTIES (Y)	D13-100	D13-150
SELIMUT	40MM	

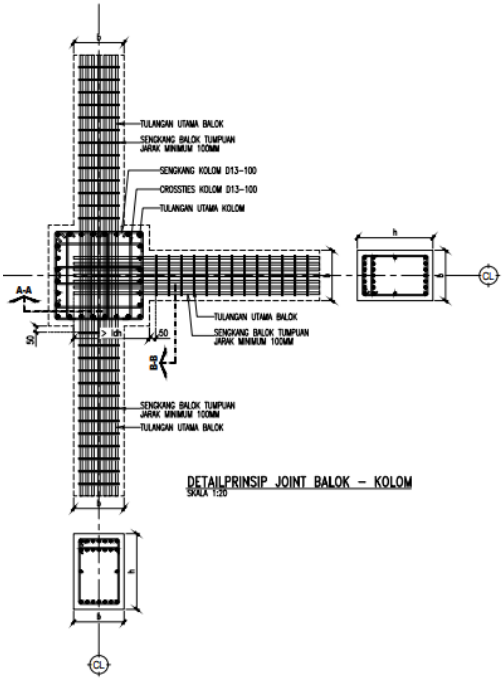
BALOK KOLEKTOR

TIPE BALOK	BK45 (LT-16 ~ LT-ATAP)	
POTONGAN	⬢12 D 25 	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13-75	D13-150
CROSSTIES (X)	D13-75	D13-150
CROSSTIES (Y)	D13-75	D13-150
SELIMUT	40MM	

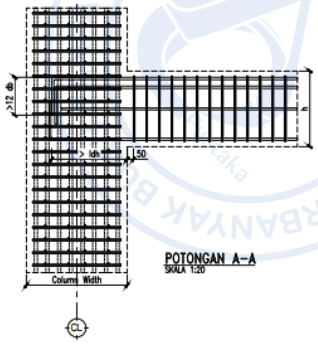
BALOK KOLEKTOR

TIPE BALOK	BK35	
POTONGAN	⬢12 D 16 	
POSISI	TUMPUAN	LAPANGAN
SENGKANG	D13-50	D13-75
CROSSTIES (X)	D13-50	D13-75
CROSSTIES (Y)	D13-50	D13-75
SELIMUT	40MM	

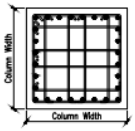
TABEL PENULANGAN BALOK KOLEKTOR
SKALA 1:20

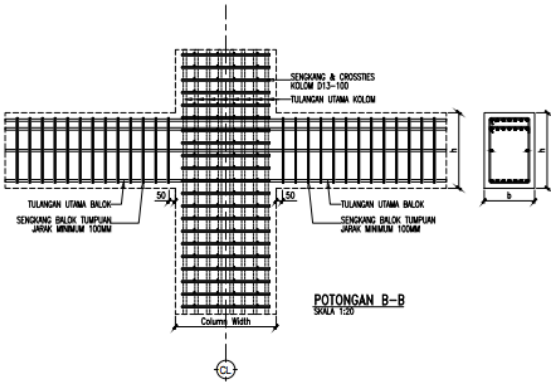


DETAILPRINSIP JOINT BALOK – KOLOM
SKALA 1:20

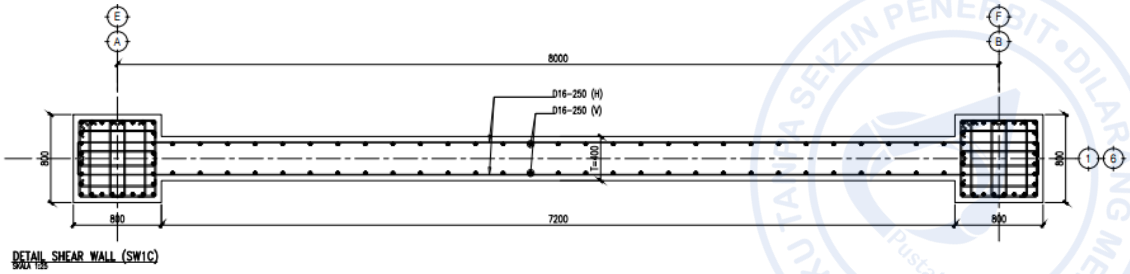


POTONGAN A-A
SKALA 1:20

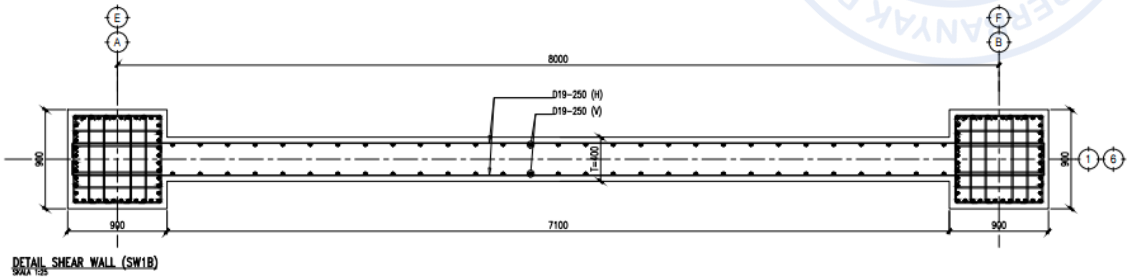




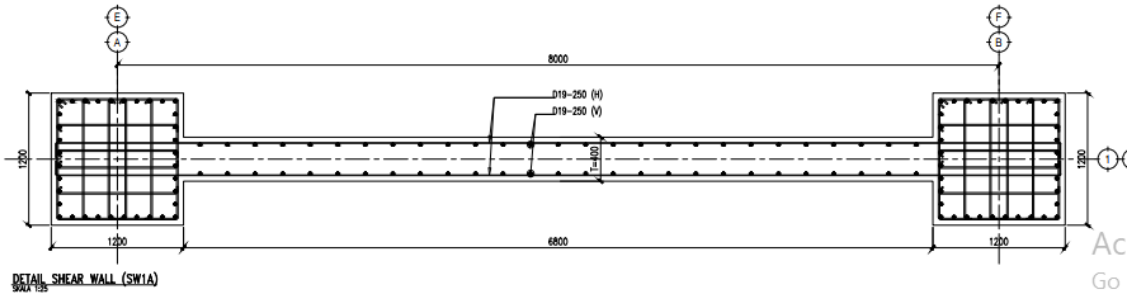
POTONGAN B-B
SKALA 1:20



DETAIL SHEAR WALL (SW1C)

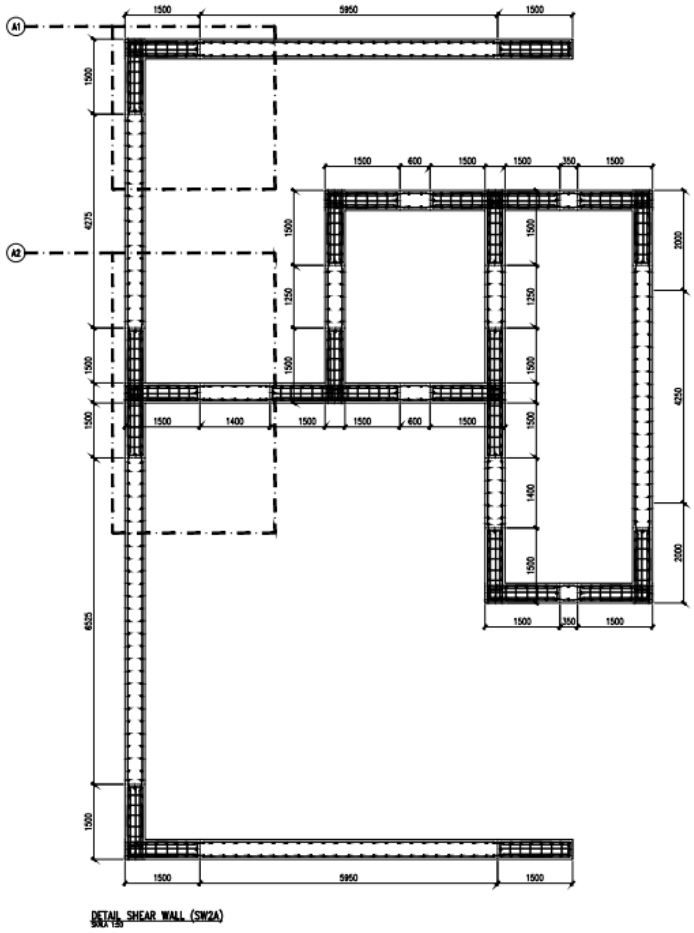


DETAIL SHEAR WALL (SW1B)

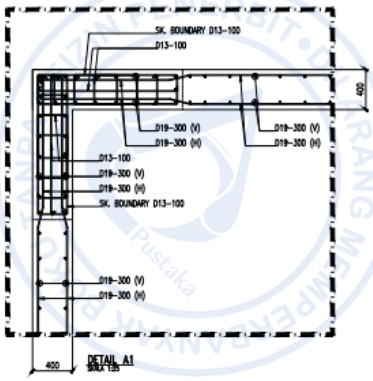


DETAIL SHEAR WALL (SW1A)

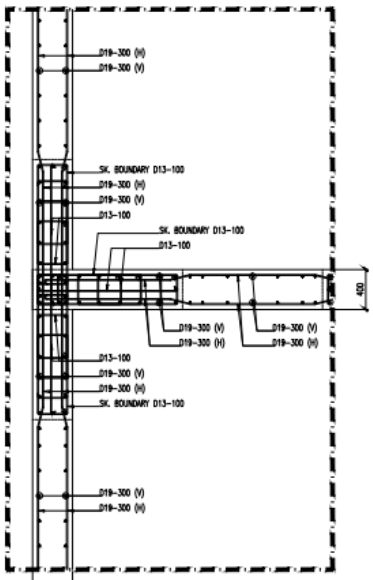
Ac
Go



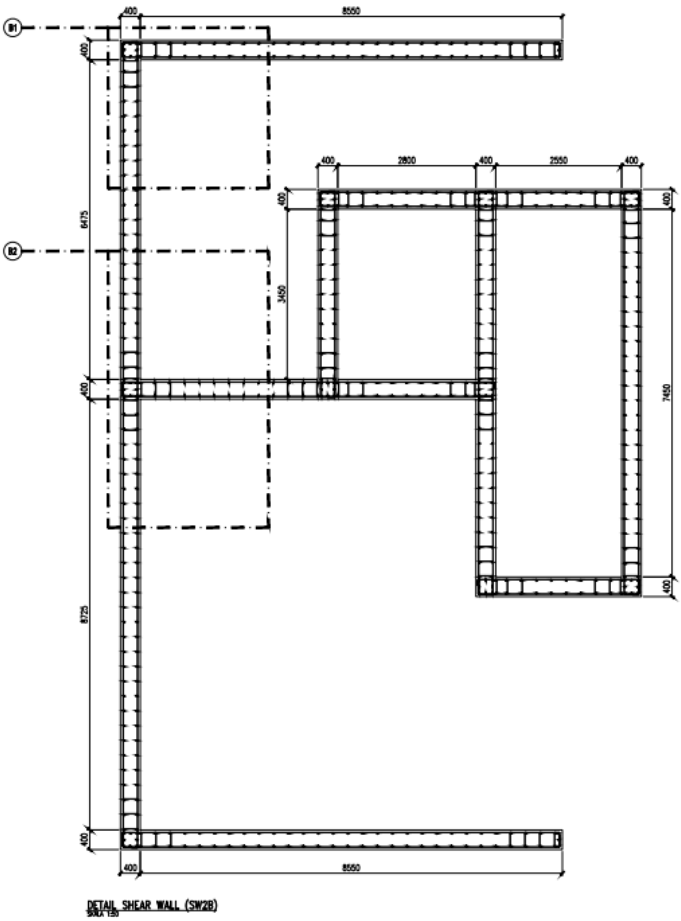
DETAIL SHEAR WALL (SW2A)
SKALA 1:25

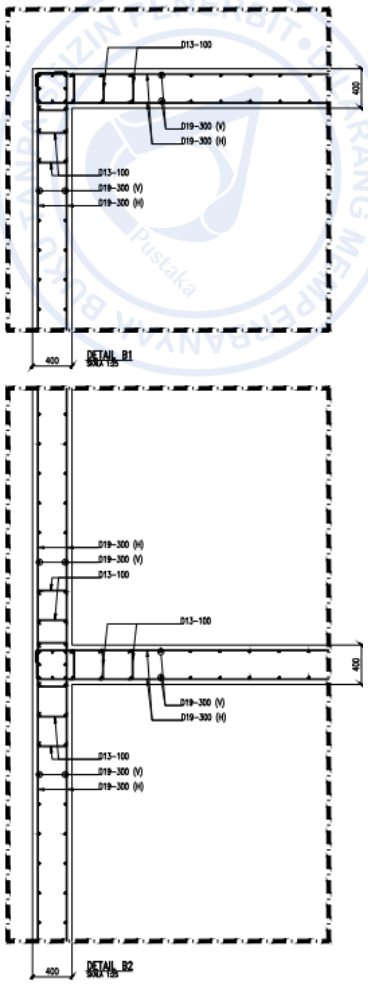


DETAIL A1
SKALA 1:25



DETAIL A2
SKALA 1:25


B1
B2
400
8550
6475
2800
2550
3400
7450
8725
DETAIL SHEAR WALL (SW2B)
SKALA 1:50


D13-100
D19-300 (V)
D19-300 (H)
400
DETAIL B1
SKALA 1:25
DETAIL B2
SKALA 1:25

LATAR BELAKANG PENULIS

Ir. Totok Andi Prasetyo, M.T., AU HAKI., IPU., ASEAN Eng. - (Ahli Teknik Bangunan Gedung Jenjang 9, Ahli Geoteknik Jenjang 9, dan Ahli Jembatan Jenjang 9).

Penulis merupakan dosen di Institut Sains dan Teknologi Nasional (ISTN) di Jakarta, mengajar Mata Kuliah Struktur Baja, Struktur Beton dan Pondasi. Penulis juga praktisi profesional dan Direktur Teknik PT TAP Rekayasa Struktur di Bekasi. Penulis menempuh pendidikan S1 di Universitas Islam Indonesia (UII) Yogyakarta lulus Tahun 2001, lalu mengambil Magister Teknik (MT) di kampus ISTN dari tahun 2018 lulus 2020. Penulis memiliki pengalaman 24 tahun sebagai praktisi dalam bidang struktur dan geoteknik. Penulis sedang meneruskan program Doktoral di Unissula tahun 2024 sampai sekarang. Berbagai macam bangunan yang penulis tangani mulai dari struktur baja yang sederhana sampai yang *complicated industrial building*. Selain struktur baja, beliau juga menangani struktur beton dari *low-rise* sampai *high-rise building*. Buku ini disusun berdasarkan SNI yang terbaru.

Harun Napitupulu, S.T., M.T. - (Ahli Muda Teknik Bangunan Gedung Jenjang 7).

Penulis merupakan lulusan Sarjana Teknik dari Universitas Jakarta dan Magister Teknik dari Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta. Penulis seorang praktisi profesional di dunia teknik sipil. Memiliki pengalaman di bidang perancangan, pelaksanaan serta pengawasan proyek konstruksi khususnya bangunan dengan rangka beton bertulang. mulai dari dari *low-rise* sampai *high-rise building*. Buku ini disusun berdasarkan SNI yang terbaru.

PT. Rahmi Ida Nusantara

www.elprosteel.com | 0816966979
sales.jkt@elprosteel.com | sales.sby@elprosteel.com | sales.bekasi@elprosteel.com

ELCOM ELPRO

ELPRO dan ELCOM adalah merek unggulan **PT. RAHMI IDA NUSANTARA** yang terpercaya dalam metal electrical product industry, menghadirkan solusi berkualitas tinggi seperti cable support, cable ladder, cable tray, dan pipe conduit. Dengan mengadopsi filosofi "Continuous Improvement" dan "Zero Defect", kami berkomitmen untuk memberikan produk yang andal, presisi, dan tahan lama guna mendukung sistem instalasi listrik yang aman dan efisien.

Office : Plaza Amstedam B50, Sentul City, Bogor - 16810
+6221 8796 2255 - 59

CABLE TRAY
CABLE LADDER

STEEL PIPE CONDUIT

CABLE SUPPORT
(ACCESSORIES)

PT. Nusantara Puncak Mahodaya

www.masakaya.com | 0816766979 | sales@masakaya.com

CHEMICALS
SPECIALIST

BATA
RINGAN

ATAP

BIOSEPTIC
TANK

PREFABRIKASI HOUSE

TOREN AIR

MASAKAYA

Masakaya merupakan merek unggulan **PT. NUSANTARA PUNCAK MAHODAYA** yang dikembangkan untuk menjawab kebutuhan sektor konstruksi modern. Dengan komitmen terhadap inovasi dan standar kualitas tinggi, Masakaya hadir sebagai solusi terpercaya untuk memperkuat struktur, memberikan perlindungan maksimal, serta memperpanjang usia layanan infrastruktur Anda.

Office : Ruko Surya Inti Permata Blok E36-37, Surabaya - 60237
+6231 843 0999 / +6231 849 0989

Prof. Dr. Ir. Redi Nusantara, M.M.

Factory : Kawasan Industri Terboyo Blok M111 Semarang, Jawa Tengah 50118
Telp: (024) 6590555-6 | Fax: (024) 6590565 | WhatsApp: 087731666655

PT. ALCOS GRAHA JAYA

PT. Alcos Graha Jaya berdiri tahun **1984** di bidang konstruksi baja dan sipil.
Sejak tahun 2000, perusahaan memperluas service pelayanan.

Visi
Menjadi perusahaan konstruksi nasional yang kompetitif.

Misi
- ✓ Menjaga kualitas dan kuantitas hasil pekerjaan untuk kredibilitas perusahaan.
- ✓ Mematuhi norma 3K (Kesehatan, Keselamatan, Keamanan).
- ✓ Menjaga kebersihan lingkungan & mengelola limbah proyek.
- ✓ Menjaga profesionalisme & etika dalam setiap pekerjaan

Legalitas & Sertifikasi

1. NIB: 9120406991417
2. NPWP: 01.682.774.3-007.000
3. SIUJK – Izin Usaha Jasa Konstruksi
4. SBU – Sertifikat Badan Usaha bidang konstruksi industri, perkantoran, & perumahan
5. ISO 9001, 37001, 45001
6. Anggota KADIN & GAPENSI
7. Tenaga ahli bersertifikat K3 & LPJK

☎ 021 - 8887 8435 ✉ info@alcosgrahajaya.co.id 🌐 www.alcosgrahajaya.co.id

Head Office:
Commercial II, Jl. Sentra Primer Tim. No.17 Blok CP.2, RW.6, Pulo Gebang, Kec. Cakung,
Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13950

Operational Office & Workshop :
Jl. Raya ujung harapan i no. 50,
Kampung rawa silam rt.08 rw.06 kaliabang tengah, Bekasi utara, bekasi 17125

Warehouse :
- Bekasi
- Karawang
- Subang

SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU

Product & Services

Scope

- Engineering
- Build & Design
- Fabrication & erection

Building Office & Factory

- Building Foundation
- Machine Foundation
- Reinforcement Concrete Structure
- Steel Structure
- Composite Structure
- Roofing & Cladding
- Facade
- Interior & furniture

Civil Work

- Flexible pavement for road & yard
- Rigid pavement for road & yard
- Drainage
- Retaining wall & embankmen

M E P

- Fire Hydrant
- Fire Alarm
- Lighting
- Lightning Protection
- Plumbing
- AC dan Ventilation

Our Client :

PT. AICA INDONESIA	PT. ISUZU ASTRA MOTOR INDONESIA	PT. PINDO DELI PULP AND PAPER MILLS
PT. AIKO NEGARA DAHA	PT. KANSAI PAINT INDONESIA	PT. PARKER ENGINEERING IND
PT. AKS PRECISION BALL INDONESIA	PT. KASAI TECK SEE INDONESIA	PT. PULOGADUNG PAWITRA LAKSANA
PT. ASTRA DAIHATSU MOTOR - SUNTER PLANT	PT. KATSUSHIRO INDONESIA	PT. SAINT GOBAIN ABRASIVES DIAMAS
PT. ASTRA DAIHATSU MOTOR - KAP, KARAWANG	PT. KAWAMURA INDAH	PT. SAINT GOBAIN PERFORMANCE PLASTICS IND.
PT. ASTRA DAIHATSU MOTOR - CASTING PLANT	PT. KIMBERLY-CLARK INDONESIA	PT. SANWAMAS METAL INDUSTRY
PT. ASTRA INTERNATIONAL, TBK	PT. KOMATSU INDONESIA	PT. SARANA UTAMA ADIMANDIRI
PT. ATLAS COPCO INDONESIA	PT. KOMATSU INDONESIA - CIBITUNG PLANT	PT. SCHLUMBERGER GEOPHYSICS NUSANTARA
PT. BRIDGESTONE TIRE INDONESIA	PT. KOMATSU INDONESIA - KBN PLANT	PT. SHIN-ETSU POLYMER INDONESIA
PT. BUMITANGERANG MESINDOTAMA (COCOA) / OFI	PT. KOMATSU MARKETING & SUPPORT IND	PT. SLP INTERNUSA KARAWANG
PT. CENTURY BATTERIES INDONESIA	PT. KOMATSU UNDERCARRIAGE INDONESIA	PT. SOLUSI BANGUN BETON
PT. CIPTA MORTAR UTAMA	PT. LG ELECTRONICS INDONESIA	PT. TIAHUA SAKTI MOTOR
PT. DIAN SWASTATIKA SENTOSA, Tbk	PT. MEGAPRIMA PERSADA SAKTI	PT. TOYOTA MOTOR MFG. IND.
PT. DOWELL ANADRILL SCHLUMBERGER	PT. MITSUBISHI KRAMA YUDHA MOTORS AND MFG.	PT. TRAKTOR NUSANTARA
PT. FUJI TECHNICA INDONESIA	PT. MESIN ISUZU INDONESIA	PT. TRIDAYA ADUNG MUKTI
PT. GAYA MOTOR	PT. MULTISTRADA ARAH SARANA Tbk / PT MICHELIN	PT. WIJAYA KARYA
PT. GREECHAIN TRUCKS INTERNATIONAL	PT. MOMOZEN AMUSEMENT INDONESIA	PT. YAMAHA INDONESIA MOTOR Mfg
PT. HANKEN INDONESIA	PT. NISSEN CHEMITEC INDONESIA	PT. YAMAHA INDONESIA MOTOR Mfg - WEST JAVA
PT. HINO MOTORS SALES INDONESIA	PT. NINDYA KARYA	PT. YAMAHA MOTOR NUANSA IND.
PT. HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY INDONESIA	PT. OGAWA INDONESIA	PT. YAMAHA MOTOR RND INDONESIA
PT. INTI PANTJA PRESS INDUSTRI	PT. PANTOS LOGISTICS JAKARTA	

SEIZIN PENERBIT • DILARANG MEMPERBANYAK BUKU • Pustaka

Experience

Project Name	Main Office
Client	PT. Komatsu Indonesia
Year	2012

Project Name	Factory Kasai Tech See Indonesia Plant 2
Client	PT. Kasai Tech See Indonesia
Year	2013

Project Name	Gedung Harmoni
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2014

Project Name	Takumi Training Center
Client	PT. Komatsu Indonesia
Year	2015

Project Name	Factory Equipment Support For Hammer 11 Ton
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2018

Project Name	Administration Office
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2019

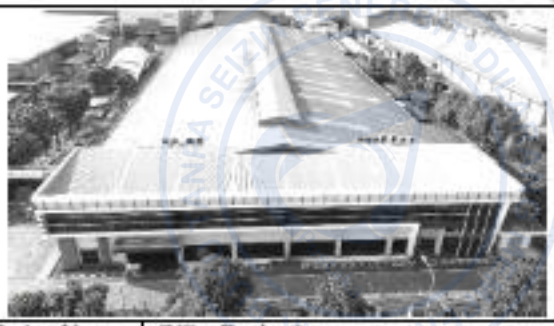
Project Name	Gedung Parkir Motor
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2019

Project Name	Main Office
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2019

SEIZIN PENERBIT • DILARANG

Experience

Project Name	Ferris Wheel – Aeon Mall
Client	PT. Momozen
Year	2012



Project Name	Office Production
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2018

Project Name	Employee Center
Client	PT. Komatsu Undercarriage Indonesia
Year	2022

Project Name	Tear Down R&D
Client	PT. Astra Daihatsu Motor – Karawang Plant
Year	2022

Project Name	Data Center
Client	PT. Astra Daihatsu Motor – Karawang Plant
Year	2023

Project Name	Canteen Public Facilities
Client	PT. Bumi Tangerang Mesindotama
Year	2023

Project Name	Ferris Wheel
Client	PT. BALI EYE EXPERIENCE
Year	2024

Project Name	New Press Room
Client	PT. Bumi Tangerang Mesindotama
Year	2024

PT FIRGAR ENJINIRING INDONESIA

General Contractor & Aplikator Konstruksi Baja

Office, Jl Kampung Sumur No 5, Klender Jakarta Timur
Workshop Baja, Jl. Cikamurang-Subang, Kec Cikamurang 141 Kabupaten Indramayu (Tol Cipali exit KM 137) Email : firgarenjiniring@gmail.com , Telp : 021-27617840 Hp 081222483109

Kontraktor Kompetitif Melayani Project Seluruh Nusantara

WORKSHOP FEI

PERUSAHAAN KAMI

Kami Main Contractor sejak 2013 pekerjaan Pondasi, Struktur Baja, Struktur Beton, Arsitektur, Interior, Mekanikal, Elektrikal, dan Plumbing melayani di seluruh Nusantara.

DEWAN DIREKSI

Direktur Utama	: Ir. Johan Firgar S.T., M.B.A.
Direktur	: Enjat Sudrajat
Komisaris	: Lani Prawestu S.T.

NIB 9120005362
SBU Kontruksi PB-UMKU 912000536272500050001
KBLI 68111 Real Estat
KBLI 41011 Konstruksi Gedung Hunian
KBLI 41016 Konstruksi Gedung Pendidikan
KBLI 41014 Konstruksi Gedung Pembelanjaan
KBLI 41012 Konstruksi Gedng Perkantoran
WPSPQR MIGAS PT FEI No.ARR-10293-0995-2019

PRODUK KAMI

1. Gedung Perkantoran
2. Gedung Sekolah
3. Infrastruktur
4. Gedung Industri
5. Rumah Mewah
6. Rumah Sederhana
7. Bangunan Ruko
8. Gedung Aula
9. Gedung Parkir
10. Gedung komersil
11. Lansekap
12. Konstruksi Baja

INSPEKSI BAJA

Test NDT WPSPQR MIGAS PT FEI No.ARR-10293-0995-2019

Toolbox meeting

Visit Client

Romberg Test

Contact :
0812-2248-3109
021-2761-7840

PROJECT
DOCUMENTATION

Masjid Percikan Iman
Jawa Barat 2024

Real Estat Serpong
ONXY 2023

LMAN KemenKeu Solo
Jawa Tengah 2023

Apartemen LMAN Puri
Kemayoran Jakarta 2022

Apartemen LMAN
Mitra Bahari Jakarta 2022

LMAN KemenKeu
Jakarta 2023

Rocca/Hollywing
QBIG Serpong 2022

Apartemen LMAN Mitra
Sunter Jakarta 2022

Gedung Bupati Musirawas
Utara Sumsel 2021

Konstruksi Baja
Seimengkei Sumut 2021

Contact :
0812-2248-3109
021-2761-7840

PROJECT DOCUMENTATION

Gedung DPRD Musirawas Utara Sumsel 2021

Baja Gedung Galeri Menteng Jakarta 2020

Konstruksi Baja Vilaverde Timor Leste 2020

Aula Keuskupan Maliana Timor Leste 2022

SPBU Shell Kertajaya Surabaya Jawa Timur 2019

Hanggar Feri Tofoi Papua Barat 2018

Hanggar Feri Tofoi Papua Barat 2018

Contact :
0812-2248-3109
021-2761-7840

PROJECT DOCUMENTATION

Gerbang Timur Pantai Pangandaran
Jawa Barat 2018

Gedung Bottle Storage LNG
Tangguh Papua Barat 2018

New Building PT Biz Data Office
Jakarta

Camara Eclestiastica Keuskupupan
Maliana Timor Leste 2017

Gereja Lolotoe
Timor Leste 2017

Univ Dapas Liquca
Timor Leste 2017

Factori Outlet 3second-Famo
2016 Malang,Purwakarta,
Makasar 2016

Gedung 5 lantai Univ. Dapaz
Dili Timorleste 2017-2018

Contact :
0812-2248-3109
021-2761-7840

TENTANG PILAR ABADI LESTARI

Dengan tim yang terampil dan berpengalaman, Pilar Abadi Lestari mampu menyediakan solusi scaffolding yang tepat sesuai dengan kebutuhan proyek-proyek konstruksi dan industri di seluruh Indonesia. Mereka tidak hanya menyediakan layanan penyewaan scaffolding berkualitas tinggi, tetapi juga menawarkan layanan pemasangan dan pembongkaran yang profesional dan efisien.

Perusahaan ini berkomitmen untuk menjaga standar keselamatan yang tinggi dalam setiap aspek operasionalnya. Mereka mengutamakan pelatihan dan sertifikasi bagi semua karyawan mereka, serta menggunakan peralatan scaffolding yang terbaru dan terbaik dalam industri ini.

PT Pilar Abadi Lestari juga dikenal karena fleksibilitasnya dalam menyesuaikan solusi scaffolding sesuai dengan spesifikasi dan jadwal proyek. Mereka memahami betapa pentingnya kecepatan dan akurasi dalam industri konstruksi modern, dan selalu siap untuk memberikan layanan yang dapat diandalkan dan responsif kepada pelanggan mereka. Dengan visi untuk menjadi mitra terpercaya dalam setiap proyek konstruksi,

Dengan dedikasi mereka terhadap keamanan, kualitas, dan kepuasan pelanggan, Pilar Abadi Lestari terus menjadi pilihan utama bagi pelanggan yang membutuhkan solusi scaffolding yang handal dan profesional di Indonesia.

SCAFOLDING

Percayakan kebutuhan konstruksi Anda pada kami! Kami menyediakan layanan penyewaan scaffolding terlengkap dengan berbagai tipe dan ukuran sesuai kebutuhan proyek. Dengan material berkualitas tinggi, standar keamanan terjamin, serta harga sewa yang kompetitif,

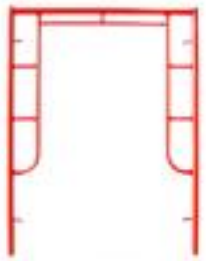
RING LOCK SCAFFOLDING GALVANIZED

METAL PLANK / ASIBA

FRAME SCAFFOLDING PAINTED

Main Frame Painted

TUBULAR SYSTEM



Ladder Frame 0.90 Galvanized

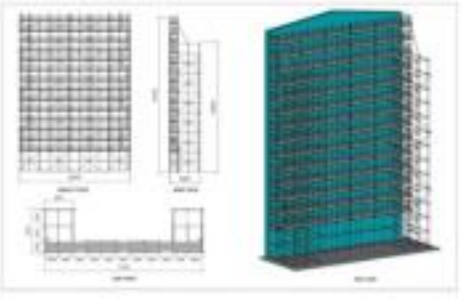
Cross Brace Galvanized

Tangga / Stair Scaffolding Galvanized

Catwalk Plank Galvanized

Join Pin Galvanis

ATTACHMENT GAMBAR DRAWING SCAFFOLDING



FORMWORK

Kami menyediakan berbagai jenis formwork berkualitas tinggi – mulai dari bekisting konvensional, sistem knock down, hingga formwork modern berbahan baja dan aluminium – yang dirancang untuk memberikan hasil pengecoran lebih presisi, efisien, dan aman.

Column Formwork

Tunnel Formwork

Wall Formwork

Slab Formwork

Kami siap menjadi mitra terpercaya untuk memenuhi semua kebutuhan bekisting proyek Anda, baik skala kecil, menengah, maupun besar.

www.pilarabadi.com

INSPECTION *Bidang Laboratorium*

SAMPLING DAN PENGUJIAN UDARA (LINGKUNGAN)

- Udara Ambien
- Udara Emisi Sumber Tidak Beregrak
- Udara Emisi Sumber Beregrak

SAMPLING DAN PENGUJIAN PADATAN

- Tanah (terganggu &/utuh) dan tanah terkontaminasi B3
- Lumpur (sludge), slurry, abu, granula, serbuk, terak

SAMPLING DAN PENGUJIAN AIR

- Air Limbah
- Air Permukaan (sungai &/danau)
- Air Laut
- Air Tanah
- Air Bersih

SAMPLING DAN PENGUJIAN UDARA LINGKUNGAN KERJA

- Faktor Fisika
- Faktor Kimia
- Faktor Ergonomi
- Faktor Psikologi

INSPECTION *Bidang Konsultan Lingkungan*

PENYUSUNANAN DOKUMEN LINGKUNGAN

- AMDAL/DELH
- UKL-UPL/ DPLH
- RKL-RPL
- Rinci SPPL

PENYUSUNAN DOKUMEN PERSETUJUAN TEKNIS (PERTEK) LIMBAH BAHAN BERBAHAYA & BERACUN (LB3)

- Pengumpulan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (LB3)
- Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (LB3)
- Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (LB3)
- Penimbunan Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (LB3)
- Rincian Teknis Penyimpanan Sementara Limbah Bahan Berbahaya & Beracun (LB3)

PENYUSUNAN DOKUMEN PERSETUJUAN TEKNIS (PERTEK) AIR

- Pembuangan Air Limbah ke Badan Air permukaan
- Pembuangan Air Limbah ke formasi tertentu
- Pemanfaatan Air Limbah ke formasi tertentu
- Pemanfaatan Air Limbah untuk aplikasi ke tanah
- Pembuangan Air Limbah ke Laut

PENYUSUNAN DOKUMEN PERSETUJUAN TEKNIS (PERTEK) EMISI UDARA

- Pembuangan emisi udara

INSPECTION *Bidang Konsultan PBG & SLF*

PENYUSUNANAN DOKUMEN DAN PERIZINAN

- Persetujuan Bangunan Gedung (PBG)
- Setifikat laik Fungsi (SLF)

PEMBUATAN GAMBAR

- Site plant Shop built drawing ,
- As built drawing

PT. FEDERAL FOOD INTERNUSA
Empowering Solutions for Chocolate

MORE INFO

+62 878-4000-1942

sales@pilarabadi.com