

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai variasi penempatan dinding geser, evaluasi kinerja bangunan dan keruntuhan progresif, antara lain sebagai berikut.

- a. Keruntuhan Progresif Gedung Beraturan Sistem Ganda (Fazrian dkk., 2017).
- b. Studi Penempatan Dinding Geser Terhadap Waktu Getar Alami Fundamental Struktur Gedung (Effendi dkk., 2017).
- c. Evaluasi Kinerja Struktur pada Gedung Bertingkat dengan Analisis *Pushover* menggunakan *software* ETABS (Studi kasus: Hotel di Wilayah Karang Anyar) (Riantoby dkk., 2014).
- d. Evaluasi Kinerja Bangunan Rencana Gedung Hotel A.N.S dengan Dilatasi (Model B2) di Daerah Rawan Gempa (Nugroho, 2015)
- e. Evaluasi Gedung MNC Tower Menggunakan SNI 03-1726-2012 Dengan Metode *Pushover Analysis* (Aribisma dkk., 2015)
- f. Keruntuhan Progresif Gedung Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan (Yolanda dkk., 2017).
- g. *Progressive Collapse Of Structure* (Starossek, 2009).
- h. Kajian Posisi *Shearwall* Pada Gedung Tidak Beraturan Dengan Analisis Riwayat Waktu Beban Gempa (Nurchayyo dkk., 2016).
- i. Perilaku Struktur Gedung 18 Lantai Dengan Dinding Geser Sebagai Penahan Gaya Gempa (Studi Kasus Apartemen dan Kondotel Mataram City Yogyakarta) (Astuti, 2014).
- j. Analisis *Layout Shearwall* Terhadap Perilaku Struktur Gedung (Andalas dkk., 2016).
- k. *Simplified progressive collapse simulation of RC frame-wall structures* (Bao Yihai., Kunnath, S, K., 2010).
- l. *Progressive Collapse Resistance Of Two Typical High-Rise RC Frame Shear Wall Structures* (Ren dkk., 2014).

- m. *Three-Dimensional Progressive Collapse Analysis Of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected To Sequential Column Removal* (Arshian, A, H., Morgenthal, G., 2017).
- n. *Modeling Progressive Collapse Of 2D Reinforced Concrete Frames Subject To Column Removal Scenario* (Weng dkk., 2017).
- o. *Assessment Of Dynamic Increase Factor For Progressive Collapse Analysis Of RC Structures* (Amiri dkk., 2018).

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan penulis, tugas akhir dengan judul “Analisis Keruntuhan Bertahap (*Progressive Collapse*) pada Gedung Akademik 7 Lantai Yogyakarta” dengan konfigurasi *shear wall* belum pernah digunakan sebelumnya, sehingga penelitian tugas akhir ini dijamin keaslian penelitiannya.

2.1.1. Perilaku Struktur Menggunakan Konfigurasi Dinding Geser

Astuti (2014) penelitian ini dilakukan dengan perhitungan analitis yang didasarkan pada data teknis lapangan, mutu bahan, dan hasil analisis struktur dengan *software* SAP2000 kemudian dilakukan analisis kekuatan dan kekokohan pada struktur. Struktur bangunan merupakan gedung Apartemen dan Kondotel. Dalam penelitian ini dilakukan 3 macam modifikasi perletakan dinding geser untuk mengetahui pengaruh penambahan dinding geser terhadap waktu getar alami struktur. Penampang dinding geser berbentuk I, dan U. Dinding geser diletakkan dibagian sudut bangunan dan di bagian tangga darurat. Effendi dkk. (2017) juga telah dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh konfigurasi penempatan dinding geser terhadap waktu getar alami fundamental struktur gedung serta gaya geser dasar, simpangan antar lantai, dan gaya dalam pada struktur gedung 10 lantai akibat adanya beban seismik. Semua konfigurasi dinding geser dianalisis dengan *software* ETABS. Pemasangan dinding geser pada struktur gedung ini berbagai model variasi tata letak dinding geser yang berbeda-beda seperti dibagian sudut gedung, dibagian tengah, dan dibagian samping gedung. Jenis dinding geser yaitu *frame walls* dan *core walls*. Nurcahyo dkk. (2016) penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak ketidakaturan struktur terhadap eksentrisitas struktur bangunan dan efektivitas berbagai konfigurasi

dinding geser untuk menahan beban gempa. Bangunan yang akan dianalisis adalah gedung Rumah Sakit Aulia 9 lantai dengan sejarah waktu muat gempa. Pemodelan dilakukan dengan bantuan program elemen hingga. Model dibuat untuk bangunan tanpa dinding geser, ada dan modifikasi *shear wall*. Penampang dinding geser berbentuk I, dan U yang ditempatkan pada daerah lift dan bagian sudut bangunan. Analisis ini dihasilkan periode fundamental dan perpindahan maksimum bangunan sebagai *output*. Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa modifikasi 2 adalah model yang paling efektif untuk menahan beban gempa. Andalas dkk. (2016) penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penempatan posisi dinding geser pada suatu model struktur bangunan menggunakan analisis *statik non-linear (pushover)* menggunakan *software* SAP2000. Penampang dinding geser hanya berbentuk I saja, dengan penempatan dinding geser dibagian tengah pada bagian sisi pendek dan sisi panjang struktur gedung. Jumlah dinding geser 4 buah dengan ketebalan 40 cm. Hasil penelitian sebagai berikut. Penempatan posisi dari dinding geser lebih optimum apabila ditempatkan pada sisi gedung yang paling pinggir sehingga dapat menghasilkan kekakuan struktur yang lebih besar daripada dinding geser diletakkan didalam struktur gedung, sehingga semakin tinggi kekakuan yang dimiliki oleh struktur gedung tersebut maka semakin tinggi pula *performance* dari daktilitas struktur gedung tersebut.

2.1.2. Evaluasi Kinerja Struktur Gedung

Riantoby dkk. (2014) penelitian ini tentang evaluasi kinerja struktur dengan analisis *pushover* menggunakan bantuan program ETABS. Gedung ini memiliki 3 *basement* dan 11 lantai. Hasil penelitian ditunjukkan perpindahan pada gedung dibawah batas yang diizinkan. Bangunan mengalami kerusakan kecil yang diakibatkan kekakuan struktur, bangunan termasuk ke dalam level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Nugroho (2015) juga dilakukan penelitian tentang evaluasi kinerja bangunan. Metode analisis yang digunakan analisis *pushover*. Hasil penelitian ditunjukkan model bangunan B2 tidak ada yang melewati *Life Safety (LS)* sehingga kinerja dari struktur disimpulkan baik. Aribisma dkk. (2015) juga dilakukan penelitian tentang evaluasi gedung MNC Tower menggunakan

SNI 03-1726-2012 dengan metode analisis *pushover*. Penelitian ini digunakan bantuan *software* SAP2000. Bangunan gedung memiliki jumlah lantai sebanyak 12 lantai. Hasil penelitian ditunjukkan bahwa kinerja bangunan MNC Tower masih mampu memenuhi syarat di SNI 03-1726-2012 dan setelah dilakukan *running* SAP2000 kinerja yang ditunjukkan dari gedung ini tergolong dalam kondisi baik karena masih dalam kinerja level warna hijau.

2.1.3. Penelitian Terdahulu Tentang *Progressive Collapse*

Penelitian tentang analisis keruntuhan bertahap (*progressive collapse*) pada gedung akademik 7 lantai Yogyakarta ini tidak lepas dari penelitian-penelitian sebelumnya sebagai bahan perbandingan kajian.

Fazrian dkk. (2017) penelitian ini menggunakan *software* ETABS. Beberapa kolom di lantai pertama dari struktur dihapus kemudian dilakukan analisis untuk masing-masing struktur sampai terjadi *progressive collapse*. Analisis statika *nonlinier (pushover)* digunakan untuk menguji lokasi kolom kritis sedangkan analisis *linear* statika dilakukan untuk menemukan perbandingan kapasitas permintaan, rasio momen lentur dan indikator ketahanan seperti yang disarankan oleh GSA 2003 dan SNI 2847-2013. Bangunan gedung 10 lantai ini hanya menggunakan dinding geser berbentuk siku pada bagian sudut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur dilambangkan dalam kasus 1 dan kasus 2 yang dimuat sesuai dengan GSA 2003 mengalami keruntuhan progresif. Yolanda dkk. (2017) penelitian ini bertujuan untuk untuk menguji runtuhnya progresif struktur bangunan teratur dan tidak teratur. Penelitian menggunakan bantuan *software* SAP2000. Struktur bangunan memiliki jumlah lantai sebanyak 10 lantai tanpa menggunakan dinding geser. Analisis dilakukan dengan dihapus satu atau lebih kolom kritis dengan mengacu *General Services Administration (GSA)*. Pada prosedur analisis *statis linier* atau *nonlinier* digunakan kombinasi pembebanan $2(DL + 0.25LL)$ sedangkan pada prosedur analisis dinamis linier atau nonlinier digunakan kombinasi pembebanan $(DL+0,25LL)$ dengan *DL* adalah beban mati dan *LL* adalah beban hidup. Nilai DCR yang diijinkan untuk elemen struktur bangunan yaitu DCR kurang dari 2,0 untuk konfigurasi struktural yang beraturan dan DCR kurang dari 1,5 untuk konfigurasi struktural yang tidak beraturan. Dari

hasil analisis struktur beraturan dan tidak beraturan tersebut mempunyai tipe keruntuhan progresif yaitu tipe keruntuhan domino. Bao dan Kunnath (2010) dalam penelitian ini model dinding geser yang disederhanakan dikembangkan untuk disimulasikan perilaku inelastis dari sistem dinding geser bertingkat karena kehilangan bagian signifikan dari dinding geser di lantai 1. Analisis elemen hingga digunakan tidak hanya untuk menyediakan pemodelan wawasan tetapi juga sebagai alat untuk memverifikasi keakuratan model dinding geser. Bangunan gedung menggunakan dinding geser berbentuk siku dan I yang di tempatkan pada sisi tengah bagian samping dan dibagian sudut. Dua parameter sistem dinding geser yang dirancang untuk zona seismik yang berbeda dimodelkan menggunakan pendekatan yang diusulkan dan simulasi numerik menyusul hilangnya bagian dinding geser secara mendadak pada lantai 1. Meskipun tidak ada tanda-tanda kehancuran yang jelas di kedua sistem, penelitian ditunjukkan bahwa sistem dinding geser yang dirancang secara seismik ini lebih kuat dibandingkan dengan sistem yang dirancang untuk permintaan seismik yang jauh lebih rendah karena efektivitas tata letak struktural dan seismik. Ren dkk. (2014) penelitian ini tentang runtuhnya progresif struktur bangunan pada beton dan rangka baja struktur. Untuk menyelidiki ketahanan *progressive collapse* bertingkat tinggi beton bertulang dengan dinding geser, dua model bangunan 15 lantai dirancang dengan beban lateral yang secara keseluruhan untuk tindakan seismik. Namun *layout* dua model bangunan struktural dalam melawan gaya lateral sangat berbeda. Gedung A merupakan struktur dengan dinding kuat yang lemah sementara Gedung B merupakan struktur dengan dinding-lemah kuat. Resistensi runtuhnya progresif dan dinding geser di kedua struktur dievaluasi dalam berbagai skenario penghapusan kolom. Hasil menunjukkan bahwa ada perbedaan kinerja pencegahan keruntuhan progresif untuk berbeda *layout* struktural. Hasil penelitian ini diberikan referensi untuk desain pencegahan keruntuhan progresif bertingkat tinggi struktur beton bertulang dengan dinding geser. Arshian dan Morgenthal (2017) penelitian ini tentang respon dinamis *nonlinier* 3D dari struktur beton bertulang skenario penghapusan kolom berurutan. Hasil analisis ditunjukkan bahwa penguatan balok dengan baja ikatan eksternal pelat secara signifikan meningkatkan keuletan rotasi pada bagian balok dan memungkinkan kerusakan

struktur untuk mengakomodasi deformasi yang lebih besar. Weng dkk. (2017) analisis keruntuhan progresif beton bertulang 2D pada skenario penghapusan kolom tunggal atau ganda. Contoh numerik dengan pemuatan berbeda dan skenario penghapusan kolom diberikan untuk memvalidasi prosedur penilaian kerusakan yang disarankan, prosedur ini mengidentifikasi kegagalan kolom dan algoritma pencarian keruntuhan progresif untuk menunjukkan efektivitas pendekatan pemodelan yang diusulkan. Amiri dkk. (2018) penelitian ini tentang penilaian kerentanan bangunan terhadap keruntuhan progresif menggunakan *Nonlinear Dynamic* analisis ini memiliki akurasi lebih besar dibandingkan dengan metode lain. Namun, standar yang relevan dan pedoman desain memungkinkan penggunaan analisis *Linear Static* dan analisis *Nonlinear Static* untuk menilai risiko runtuhnya bangunan secara progresif. Untuk memperhitungkan dinamika efek karena penghapusan elemen mendadak, dua faktor amplifikasi dinamis yang berbeda yaitu, faktor peningkatan beban dan faktor peningkatan dinamis secara statis dan *nonlinier* analisis, masing-masing disarankan. Struktur bangunan tiga dimensi beton bertulang dengan panjang bentang berbeda dan sejumlah lantai dirancang yang memiliki berbagai tingkat ketahanan seismik dan diimplementasikan untuk mendapatkan rumus empiris faktor peningkatan dinamis baru. Salah satu kelebihan dari formula yang diusulkan adalah kemungkinan memprediksi tegangan dan deformasi pada anggota struktur beton bertulang setelah pemindahan kolom.

2.2. Dasar Teori

Beberapa standarisasi dan spesifikasi yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI), *General Services Administration Alternate Path Analysis & Design Guidelines For Progressive Collapse Resistance* (GSA), beberapa buku, dan jurnal-jurnal yang terkait dalam penelitian.

2.2.1. Beban Gravitasi

Pada perencanaan sebuah gedung, baik bertingkat ataupun tidak perlu memperhatikan segi kekuatan gedung, kenyamanan, ekonomis, dan pengaruh terhadap lingkungan. Aspek-aspek tersebut yang harus direncanakan dan

diperhitungkan secara matang. Salah satu aspek yang harus terpenuhi adalah dalam hal pembebanan yang telah diatur SNI 03-1727-2013 mengenai beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain. Beberapa beban tersebut diantaranya :

1. Beban Mati

“Beban mati yaitu berat dari semua bagian dari suatu gedung/bangunan yang bersifat tetap selama masa layak struktur, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian – penyelesaian, mesin – mesin, serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung tersebut” sesuai SNI 03-1727-2013 yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Berat Sendiri Bahan Gedung

BAHAN BANGUNAN	BEBAN
Baja	7850 kg/m ³
Batu alam	2600 kg/m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500 kg/m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700 kg/m ³
Batu pecah	1450 kg/m ³
Besi uang	7250 kg/m ³
Beton (¹)	2200 kg/m ³
Beton bertulang (²)	2400 kg/m ³
Kayu (Kelas 1) (³)	1000 kg/m ³
Kerikil, koral, (kering udara sampai lembab, tanpa di	1650 kg/m ³
Pasangan bata merah	1700 kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200 kg/m ³
Pasangan batu cetak	2200 kg/m ³
Pasangan batu karang	1450 kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600 kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1800 kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850 kg/m ³
Tanah, lempung, dan lanau (kering udara sampai lem	1700 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000 kg/m ³
Timah hitam (timbel)	11400 kg/m ³

Tabel 2.2 Berat Sendiri Komponen Gedung

KOMPONEN GEDUNG	BAHAN
Adukan, per cm tebal :	
- dari semen	21 kg/m ²
- dari kapur, semen merah atau tras	17 kg/m ²
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14 kg/m ²
Dinding pasangan bata merah	
- satu batu	450 kg/m ²
- setengah batu	250 kg/m ²
Dinding pasangan batako:	
Berlubang:	
- tebal dinding 20 cm (HB 20)	200 kg/m ²
- tebal dinding 10 cm (HB 10)	120 kg/m ²
Tanpa lubang:	
- tebal dinding 15 cm	300 kg/m ²
- tebal dinding 10 cm	200 kg/m ²
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
- semen asbes (etemit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11 kg/m ²
- kaca, dengan tebal maksimum 3 - 5 mm	10 kg/m ²
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40 kg/m ²
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,8 m	7 kg/m ²
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso, perm ² bidang atap	50 kg/m ²
Penutup atas sirap dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	40 kg/m ²
Penutup atap seng gelombang (BJLS-25) tanpa usuk	10 kg/m ²
Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24 kg/m ²
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11 kg/m ²
Catatan :	
1) Nilai ini tidak berlaku untuk beton pengisi.	
2) Untuk beton getas, beton kejut, beton mampat, dan beton padat lain sejenis, berat sendirinya harus ditentukan sendiri.	
3) Nilai ini adalah nilai rata-rata, untuk jenis-jenis kayu tertentu lihat Pedoman Konstruksi Kayu.	

2. Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan seperti beban angin, beban gempa, beban banjir ataupun beban mati. SNI 03-1727-2013.

Berdasarkan SNI 03-1727-2013, untuk beban plat lantai dengan kegunaan ruang kuliah digunakan beban sebesar 250 kg/m^2 untuk ruang perpustakaan, laboratorium digunakan beban sebesar 400 kg/m^2 , dan untuk beban atap sebesar 100 kg/m^2 .

3. Beban Gempa

Beban gempa merupakan semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa (Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung. 1987). Gaya-gaya yang bekerja pada beban gempa itu meliputi gaya vertikal, horizontal maupun kombinasi keduanya. Gaya-gaya tersebut harus diantisipasi agar tidak menimbulkan kegagalan struktur, jika tidak diantisipasi maka saat terjadi gempa maka besar kemungkinan struktur bangunan tersebut akan mengalami kerusakan. Beban gempa juga harus menyesuaikan dengan jenis tanah dimana bangunan tersebut didirikan.

4. Beban Angin

Beban angin adalah beban yang bekerja pada struktur akibat tekanan-tekanan dari gerakan angin. Besarnya beban angin diambil minimal 25 kg/m^2 . (PPPURG 1987). Terkait dengan kecepatan, beban angin sebesar 25 kg/m^2 tersebut setara dengan kecepatan angin sebesar 2 m/det atau angin dengan kecepatan 72 km/jam yang ditunjukkan dalam persamaan 2.1 sebagai berikut.

$$P = \frac{V^2}{16} (\text{kg/m}^2) \quad (2.1)$$

Oleh karena itu, sesuai dengan SNI 1727-1987 maka beban angin diambil sebesar 25 kg/m^2 dengan dikali suatu koefisien yang nilainya adalah sebagai berikut.

Sisi yang berhadapan dengan angin = 0,9 (tekan)

Sisi yang tidak berhadapan dengan arah angin = -0,4 (hisap)

2.2.2. Analisis Gempa Berdasarkan SNI 03-1726-2012

1. Kategori Risiko Struktur Bangunan dan Faktor Keutamaan

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 Tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung, kategori resiko bangunan dibagi menjadi 4 kategori menurut jenis pemanfaatan bangunan atau fungsi bangunan. Kategori tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 sebagai berikut.

Tabel 2.3 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa (SNI 03-1726-2012)

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen - Pusat perbelanjaan - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II

Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

- Bioskop
- Gedung pertemuan
- Stadion
- Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas penitipan anak
- Penjara
- Bangunan untuk orang jompo

III

Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

- Pusat pembangkit listrik biasa
- Fasilitas penanganan air
- Fasilitas penanganan limbah
- Pusat telekomunikasi

Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas Manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak dimana jumlah kandungannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi

kebocoran.

Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Bangunan-bangunan monumental
- Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan
- Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasikendaraan darurat
- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya
- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat
- Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat
- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat

IV

Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.

Semua kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa pada Tabel 2.3 memiliki faktor keutamaan gempa yang akan digunakan sebagai pengali dalam perhitungan beban gempa. Tabel 2.4 berikut menunjukkan hubungan kategori resiko gempa dengan faktor keutamaan gempa.

Tabel 2.4 Hubungan Kategori Risiko (SNI 03-1726-2012)

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

2. Kelas dan Klasifikasi Situs

Dalam penentuan klasifikasi situs, jenis tanah mempunyai peranan penting apabila kondisi tanah pada bangunan buruk maka semakin besar beban gempa yang akan diterima oleh bangunan tersebut. Parameter untuk pengklasifikasian jenis tanah antara lain. Kecepatan rambat gelombang rerata tanah, hasil uji NSPT, hasil uji CPT. Berikut pada Tabel 2.5 merupakan hubungan nilai parameter tersebut dengan klasifikasi situs.

Tabel 2.5 Klasifikasi Situs (SNI 03-1726-2012)

Kelas situs	v_s (m/detik)	N atau N_{ch}	s_u (kPa)
SA (batuan keras)	Kurang dari 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	> 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 – 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :			
1. Indeks plastisitas, $PI > 20$,			
2. Kadar air, $w > 40\%$			
3. Kuat geser niralir $s_u < 25$ kPa			
Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:			
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	- 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)		
	- Lempung berplastisitas sangat tinggi dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$)		
Lapisan lempung lunak dengan ketebalan $H > 35$ m.			

3. Respon Spektral Percepatan Gempa

Untuk merencanakan suatu bangunan struktur harus memerlukan penentuan nilai respons spektral pada percepatan getaran perioda pendek (F_a) yaitu 0,2 detik dan percepatan yang mewakili getaran perioda 1 detik (F_v). Nilai tersebut dapat dilihat pada SNI 03-1726-2012 atau pada situs Kementerian Pekerjaan Umum bagian Pusat Pengembangan dan Penelitian Permukiman seperti Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.

Parameter respons spektral percepatan gempa dapat ditentukan dengan cara mengalikan faktor amplifikasi seismik masing-masing perioda yang bisa diperoleh dari hubungan parameter respons spektral percepatan gempa dengan kelas situs pada Tabel 2.6 dan Tabel 2.7 dengan respons spektrum percepatan yang telah didapatkan dari peta gempa sesuai persamaan 2.2 dan 2.3 berikut.

$$S_{MS} = F_a S_S \quad (2.2)$$

$$S_{MI} = F_v S_I \quad (2.3)$$

Tabel 2.6 Koefisien Situs, F_a (SNI 03-1726-2012)

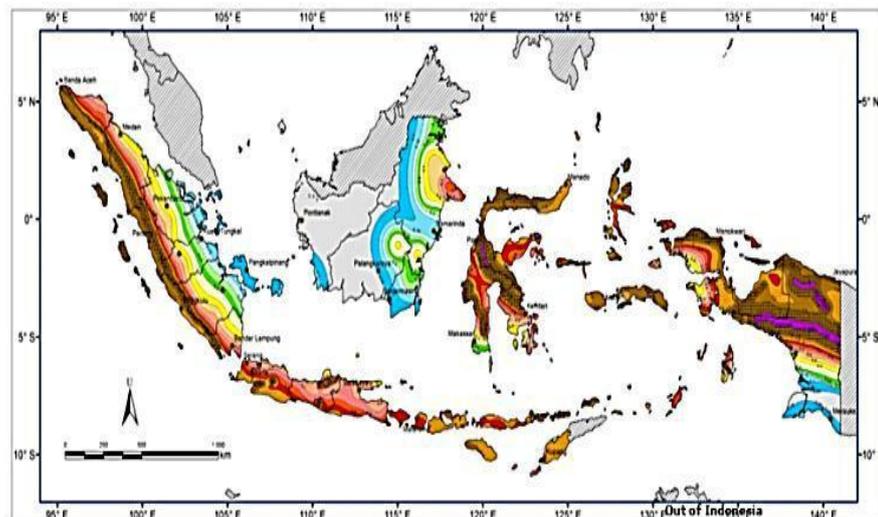
Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan pada perioda pendek, $T = 0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq$ 0,25	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1$	$S_s > 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF			SS		

Tabel 2.7 Koefisien Situs, F_v (SNI 03-1726-2012)

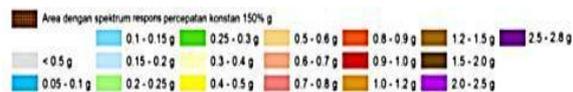
Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa terpetakan pada perioda 1 detik, $T = 1$ detik, S_I				
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I > 0,25$
SA	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
SB	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SC	1,70	1,60	1,50	1,40	1,30
SD	2,40	2,00	1,80	1,60	1,50
SE	3,50	3,20	2,80	2,40	2,40
SF			SS		

Catatan :

- Untuk nilai S_S dan S_I yang tidak terdapat pada Tabel 2.6 dan Tabel 2.7 dapat dicari menggunakan cara interpolasi linier.
- Kelas situs SF merupakan situs yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.



KETERANGAN (S_S , MCE_R):



Dikembangkan oleh:
Tim Revisi Peta Gempa Indonesia-2010 bersama dengan Tim Pengembangan Peta Gerak Tanah Seismik dan Koefisien Risiko.

Didukung Oleh:
Kementerian Pekerjaan Umum (PU), Institut Teknologi Bandung (ITB), Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Kementerian Riset dan Teknologi, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) + Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR), dan software dari United States Geological Survey (USGS).

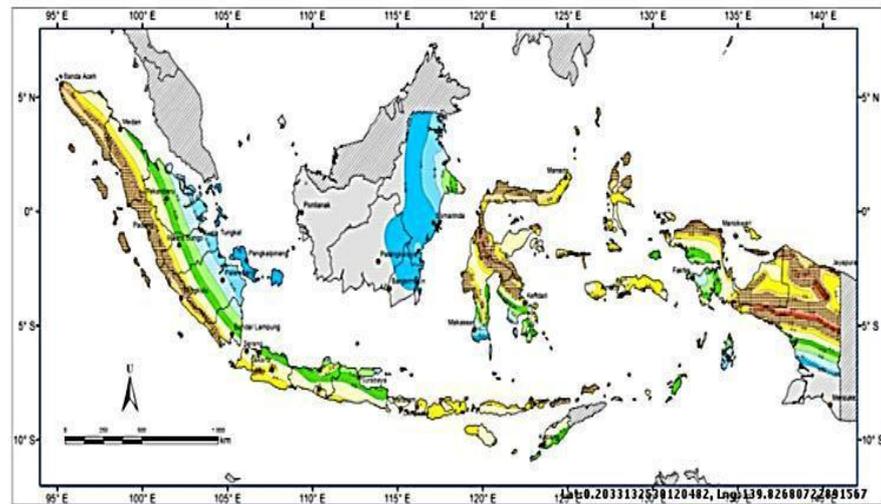
PETA ZONASI GEMPA INDONESIA



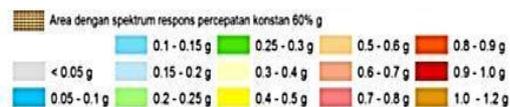
KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM

16 Mei 2010
MENTRI PEKERJAAN UMUM,
DIONO KIRMANTO

Gambar 2.1 Respons spektral percepatan perioda pendek (F_a) 0,2 detik (Pusgen, 2017)



KETERANGAN (S_1, NCE_R):



Dikembangkan oleh:
Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010 bersama dengan Tim Pengembangan Peta Gerak Tanah Seismik dan Koefisien Risiko.

Didukung Oleh:
Kementerian Pekerjaan Umum (PU), Institut Teknologi Bandung (ITB), Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Kementerian Riset dan Teknologi, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) + Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction (AIFDR), dan software dari United States Geological Survey (USGS).

PETA ZONASI GEMPA INDONESIA



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM

REVISI: Juli 2010
MENTER PEKERJAAN UMUM,
BONG KIRMANTO

Gambar 2.2 Respons spektral percepatan getaran perioda (F_v) 1 detik (Pusgen, 2017)

Setelah nilai S_{MS} , S_{MI} didapatkan dari persamaan di atas kemudian menentukan parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek 0,2 detik (S_{DS}) dan perioda 1 detik (S_{DI}) sesuai persamaan berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.4)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} \quad (2.5)$$

Dari hasil perhitungan nilai parameter spektral desain perioda pendek 0,2 detik dan perioda 1 detik selanjutnya menentukan nilai spektrum respons desain dengan menggunakan langkah-langkah sebagai berikut.

1) Untuk perioda yang lebih kecil dari T_0 , S_a , harus diambil dari persamaan;

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.6)$$

2) Untuk perioda lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S ;

$$\text{Spektrum respons percepatan desain } S_a = S_{DS} \quad (2.7)$$

3) Untuk perioda lebih besar dari T_S , S_a dihitung dengan persamaan;

$$S_a = \frac{SD1}{T} \quad (2.8)$$

Keterangan:

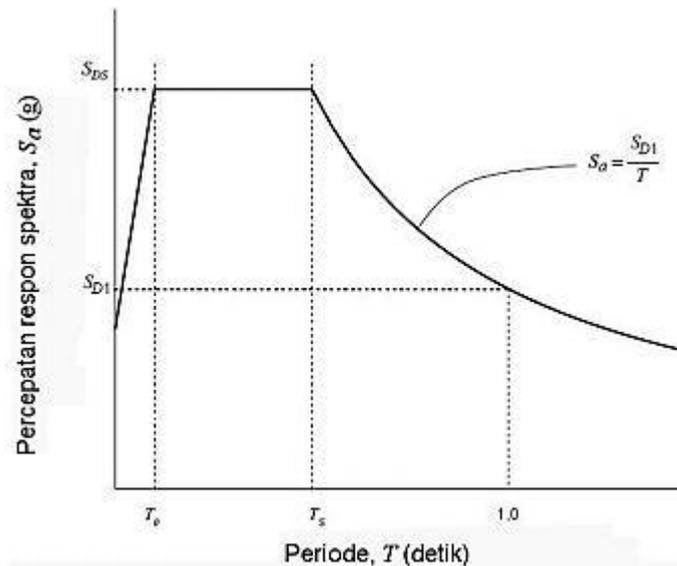
S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain perioda pendek (0,2 detik)

S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain perioda 1 detik

$$T_0 = 0,2 \frac{SD1}{S_{DS}} \quad (2.9)$$

$$T_S = \frac{SD1}{S_{DS}} \quad (2.10)$$

Dari nilai spektrum respons desain dapat digambarkan sebuah grafik respons spektral yaitu grafik hubungan perioda getaran dengan percepatan respons spektral seperti Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Spektrum respons desain (SNI 03-1726-2012)

4. Kategori Desain Seismik

Suatu bangunan harus mempunyai suatu kategori desain seismik yang mengikuti ketentuan di bawah:

- 1) Struktur bangunan dengan kategori risiko I, II, atau III dengan nilai $S_I \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik *E*.
- 2) Struktur bangunan dengan kategori risiko IV dengan nilai $S_I \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik *F*.

Struktur bangunan yang tidak termasuk dalam ketentuan di atas, jenis kategori seismiknya harus dicari berdasarkan hubungan nilai S_{DS} , S_{DI} dengan kategori risiko seperti pada Tabel 2.8 dan Tabel 2.9 berikut.

Tabel 2.8 Hubungan Nilai S_{DS} dengan Kategori Risiko pada Periode Pendek 0,2 detik (SNI 03-1726-2012)

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

Tabel 2.9 Hubungan Nilai S_{DI} dengan Kategori Risiko pada Periode 1 detik (SNI 03-1726-2012)

Nilai S_{DI}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DI} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{DI} < 1,33$	B	C
$0,133 \leq S_{DI} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DI}$	D	D

5. Pemilihan Sistem Struktur

Suatu struktur harus mempunyai sistem penahan gempa baik lateral maupun vertikal dasar. Struktur bangunan harus sesuai dengan batasan tinggi struktur dan kategori desain gempa yang dapat dilihat pada Tabel 2.10. Pada tabel tersebut hanya diambil sesuai kebutuhan penelitian, untuk lebih lengkap bisa dilihat pada SNI 03-1726-2012.

Tabel 2.10 Sistem Penahan Gaya Gempa (SNI 03-1726-2012)

Sistem penahan gaya gempa	R_a	Ω_0	C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur (m)					
				B	C	D	E	F	
A Sistem dinding penumpu									
1 Dinding geser beton bertulang khusus	5	2,5	5	TB	TB	48	48	30	
2 Dinding geser beton bertulang biasa	4	2,5	4	TB	TB	TI	TI	TI	
3 Dinding geser beton polos didetail	2	2,5	2	TB	TI	TI	TI	TI	
B Sistem Rangka									
1 Dinding geser beton bertulang khusus	6	2,5	5	TB	TB	48	48	30	
2 Dinding geser beton bertulang biasa	5	2,5	4,5	TB	TB	TI	TI	TI	
3 Dinding geser pracetak menengah	5	2,5	4,5	TB	TB	12	12	12	
C Sistem rangka pemikul momen									
1 Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB	
2 Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	3	4	TB	TB	10	TI	TI	
3 Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	3	3	TB	TB	TI	TI	TI	
D Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus									
1 Dinding geser beton bertulang khusus	7	2,5	5,5	TB	TB	TB	TB	TB	
2 Dinding geser beton bertulang biasa	6	2,5	5	TB	TB	TI	TI	TI	

Catatan : TB = tidak dibatasi ; TI = tidak diijinkan

6. Prosedur Gaya Lateral Ekuivalen

Geser dasar seismik

Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus sesuai pada persamaan berikut.

$$V = C_s \cdot W \quad (2.11)$$

Keterangan :

V = Gaya geser dasar seismik

C_s = Koefisien respons seismik

W = Berat seismik efektif

Perhitungan Koefisien Respons Seismik

Koefisien respons seismik (C_s) harus sesuai pada persamaan berikut.

$$C_s = \frac{SDS}{\frac{R}{I_e}} \quad (2.12)$$

$$C_s = \frac{SD1}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.13)$$

$$C_{s \min} = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.14)$$

Untuk struktur yang berlokasi di wilayah dimana $S_I \geq 0,6g$ harus tidak kurang dari:

$$C_s = \frac{0,5S1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.15)$$

Keterangan :

S_{DS} = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode 0,2 detik

S_{D1} = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode 1 detik

R = Faktor modifikasi respons

I_e = Faktor keutaman gempa

T = Perioa fundamental gedung (detik)

7. Penentuan Periode

Periode fundamental struktur (T) tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) didapat dari Tabel 2.11. Periode fundamental pendekatan (T_a) harus sesuai dengan persamaan berikut.

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.16)$$

Catatan :

h_n adalah ketinggian struktur (meter) sedang untuk nilai C_t dan x dapat diperoleh dari Tabel 2.12.

Tabel 2.11 Hubungan Percepatan Respons Spektral dengan Nilai C_u
(SNI 03-1726-2012)

Parameter percepatan respon spektral desain pada perioda 1 detik, S_{DI}	Koefisien C_u
$\geq 0,40$	1,40
0,30	1,40
0,20	1,50
0,15	1,60
$\leq 0,10$	1,70

Tabel 2.12 Hubungan Tipe Struktur dengan Nilai C_t dan \times (SNI 03-1726-2012)

Tipe Struktur	C_t	\times
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi/dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,80
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,90
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

8. Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Setelah didapatkan nilai nilai total gaya gempa lateral, pendistribusian beban ke plat lantai menggunakan persamaan 2.20 dengan koefisien distribusi vertikal gaya gempa sesuai dengan persamaan 2.21.

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.20)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.21)$$

Keterangan :

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya geser struktur (Kn)

h_i dan h_x = Tinggi tingkat i atau x yang diukur dari dasar struktur (m)

w_i dan w_x = Berat seismik efektif total struktur (W)

k = Eksponen yang berhubungan pada struktur, untuk perioda

$\leq 0,5$ detik menggunakan $k = 1$, untuk perioda sebesar $\geq 2,5$ menggunakan $k = 2$, untuk perioda antara 0,5 dan 2,5 detik nilai k harus dicari dengan cara interpolasi.

9. Penentuan Simpangan Antar Lantai

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) bisa didapatkan menggunakan *software SAP2000*. Simpangan antar lantai tidak diperbolehkan melebihi simpangan antar ijin (Δ_a) menurut kategori risiko struktur tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Simpangan Antar Lantai Ijin (SNI 03-1726-2012)

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

Catatan : h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x

10. Kombinasi dan Pengaruh beban Gempa

Dalam pembebanan struktur untuk kombinasi pengaruh beban gempa horisontal dipengaruhi oleh faktor redundansi (ρ), dimana ada 2 jenis faktor tersebut yaitu sebagai berikut. SNI 03-1726-2012.

- 1) Untuk ρ diijinkan sebesar 1,0 struktur dengan kategori desain seismik B atau C .
 - a. Perhitungan simpangan antar lantai dan pengaruh P -delta;
 - b. Desain komponen nonstruktura;
 - c. Desain elemen kolektor dan sambungan lewat;
 - d. Beban diafragma;
 - e. Struktur menggunakan sistem peredam;

- f. Desain dinding struktural terhadap gaya keluar bidang.
- 2) Untuk (ρ) diijinkan sebesar 1,3 struktur dengan kategori desain seismik D , E atau F kecuali satu dari dua kondisi ini terpenuhi, dimana ρ diijinkan sebesar 1,0.
- Untuk masing-masing setiap tingkat struktur yang menahan > 35% geser dasar yang ditinjau;
 - Struktur dengan desain beraturan di semua tingkat dengan sistem penahan gaya gempa paling sedikit dua bentang perimeter penahan gaya gempa yang merangka pada setiap sisi bangunan arah ortogonal di setiap tingkat yang menahan lebih dari 35% gaya geser dasar.

Pengaruh beban gempa horisontal (E_h) dan pengaruh beban gempa vertikal (E_v) harus ditentukan menggunakan persamaan 2.22 dan persamaan 2.23 sebagai berikut.

$$E_h = Q_E \rho \quad (2.22)$$

$$E_h = 0,2 S_{DS} D \quad (2.23)$$

Keterangan :

ρ = Faktor redundansi

Q_E = Pengaruh gaya gempa horisontal dari gaya dasar (V)

D = Pengaruh beban mati/*dead load*

Untuk bangunan yang tidak menggunakan beban banjir, kombinasi dasar beban seismik desains kekuatan menggunakan persamaan 2.24 dan 2.25 sebagai berikut.

$$(1,2 + 0,2 S_{DS}) D + Q_E \rho + L \quad (2.24)$$

$$(0,9 - 0,2 S_{DS}) D + Q_E \rho + 1,6H \quad (2.25)$$

Dengan catatan :

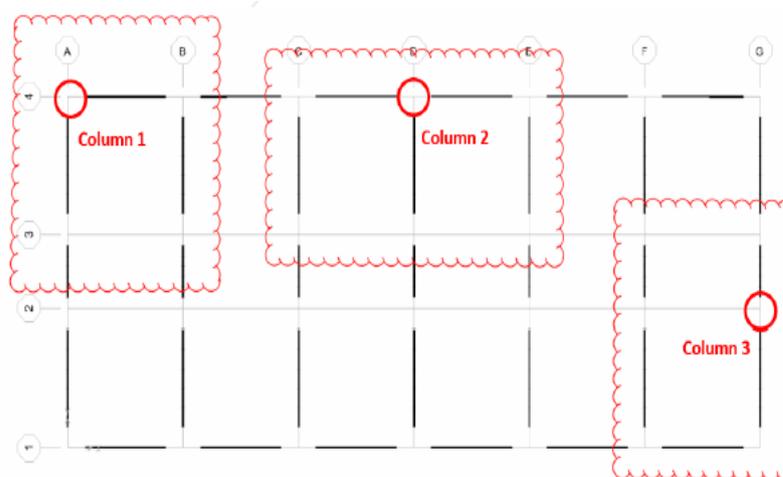
- Untuk beban hidup/*live load* merata semua hunian $\leq 5 \text{ kN/m}^2$ kecuali garasi dan ruang pertemuan.
- Faktor beban H ditetapkan sama dengan nol, apabila bangunan akibat H berlawanan aksi struktur akibat E , jika tidak berlawanan tekanan tersebut harus dimasukkan dalam tahanan desain.

2.2.3. Analisis *Progressive Collapse*

Keruntuhan progresif didefinisikan sebagai tingkat kerusakan atau kehancuran yang tidak proporsional dengan besarnya suatu kejadian tersebut. Karena definisi ini berfokus pada konsekuensi relatif atau besarnya keruntuhan daripada cara di mana hal itu terjadi, seringkali disebut dalam industri sebagai runtuh tidak proporsional daripada progresif. Situasi dimana penyebaran kerusakan lokal dari kegagalan elemen utama menyebar dari elemen ke elemen lainnya yang mengakibatkan runtuhnya seluruh atau sebagian besar dari struktur bangunan (GSA, 2013). Tiga lokasi penghapusan kolom yang disarankan menurut GSA 2013 sebagai berikut.

- 1) Penghapusan pertama : Kondisi kolom sudut
- 2) Penghapusan kedua : Kondisi kolom sisi panjang
- 3) Penghapusan ketiga : Kondisi kolom sisi pendek

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Lokasi penghapusan kolom (GSA, 2013)

Singh dkk. (2015) mendefinisikan keruntuhan progresif adalah reaksi berantai atau berkelanjutan dari kegagalan yang merambat baik di seluruh atau sebagian struktur tidak proporsional dengan kegagalan lokal aslinya. Runtuhnya struktur bangunan secara progresif dimulai ketika satu atau lebih anggota penahan beban vertikal dilepas. Starossek (2009) tipe-tipe keruntuhan progresif sebagai berikut.

1). Tipe keruntuhan *pancake*

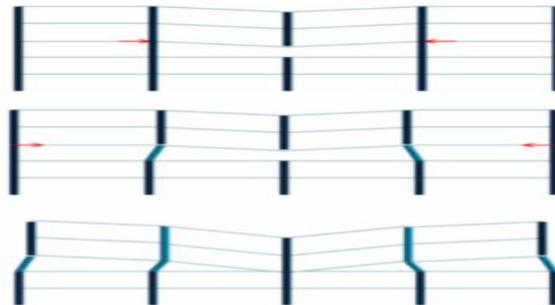
Pada tipe ini sangat kecil kemungkinan untuk merespon keselamatan manusia atau yang ada di dalam gedung tersebut. Tipe ini diawali dengan hilangnya atau berkurangnya daya dukung struktur kolom, terjadinya perpisahan pada suatu struktur, dan kegagalan seluruh komponen struktur. Tipe ini disebut keruntuhan *pancake* karena hasil akhir dari keruntuhannya berbentuk *pancake* seperti Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Tipe keruntuhan *pancake*

2). Tipe keruntuhan domino

Tipe ini diawali dengan adanya kelengkungan pada suatu bangunan, kemudian elemen tersebut mengalami kegagalan, dan elemen-elemen yang ada di wilayah tersebut juga akan mengalami kegagalan struktur. Tipe keruntuhan domino ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6 Tipe keruntuhan domino

3). Tipe keruntuhan campuran *pancake*-domino

Tipe keruntuhan ini merupakan kombinasi antara tipe keruntuhan *pancake* dengan tipe keruntuhan domino. Struktur bangunan akan mengalami keruntuhan *pancake* di satu tempat namun juga mengalami tipe keruntuhan domino di lain tempat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut..



Gambar 2.7 Tipe keruntuhan campuran *pancake*-domino

4). Tipe keruntuhan *zipper*

Tipe keruntuhan ini terjadi apabila elemen struktur mengalami kegagalan, kemudian elemen struktur tersebut akan mendistribusikan gaya ke elemen lain. Jika resistensi bagian elemen struktur yang lain terlampaui maka kegagalan akan meningkat, tipe keruntuhan *zipper* ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Tipe keruntuhan *zipper*

5). Tipe keruntuhan *instability*

Tipe keruntuhan ini terjadi akibat tidak stabilnya bagian elemen yang menerima beban, tipe keruntuhan *instability* ditunjukkan seperti Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Tipe keruntuhan *instability*