

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Pembangunan gedung bertingkat di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan kebutuhan lahan yang semakin terbatas, terutama di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung. Bangunan bertingkat dengan jumlah lantai lebih dari sepuluh dan memiliki basement kini menjadi pilihan arsitektural yang umum, baik untuk perkantoran, apartemen, maupun fasilitas umum lainnya. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2024, terjadi peningkatan sebesar 17% dalam pembangunan gedung tinggi di kawasan perkotaan dibandingkan tahun sebelumnya. Pertumbuhan ini menuntut adanya sistem struktur yang tidak hanya efisien secara ekonomis, tetapi juga andal dalam menghadapi beban ekstrem seperti gempa bumi, mengingat wilayah Indonesia berada pada zona seismik aktif di Cincin Api Pasifik.

Bangunan tinggi dengan basement memiliki kompleksitas struktural yang tinggi, terutama karena pengaruh beban lateral akibat gempa serta interaksi antara struktur dan tanah. Gempa bumi menjadi ancaman utama dalam ketahanan struktur bangunan, terutama pada struktur bertingkat yang memiliki ketidakteraturan vertikal dan horizontal. Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang mampu mengevaluasi perilaku struktur secara mendalam dan realistis terhadap beban gempa. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam praktik teknik sipil untuk menganalisis struktur dalam kondisi nonlinier adalah metode pushover, yaitu metode analisis statik nonlinier yang memberikan gambaran kinerja struktur hingga mengalami keruntuhan.

Metode pushover memungkinkan evaluasi titik leleh, distribusi sendi plastis, dan kemampuan struktur menahan beban lateral dengan mempertimbangkan deformasi dan kekakuan aktual struktur. Beberapa panduan internasional seperti ATC-40 dan FEMA 356 serta standar nasional seperti SNI 1726:2019 telah merekomendasikan penggunaan metode ini dalam pendekatan desain berbasis kinerja (performance-based design). Dalam konteks struktur bangunan 10 lantai dengan 2 basement, metode pushover menjadi penting karena dapat digunakan untuk mengidentifikasi elemen-elemen yang mengalami kerusakan dini serta mengevaluasi kapasitas maksimum struktur.

Meskipun metode pushover telah banyak diterapkan, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya fokus pada bangunan rendah atau tanpa basement. Sebagai contoh, penelitian oleh (Arifin, Z. S. 2016) mengkaji kinerja struktur baja pada bangunan beraturan menggunakan pushover, tetapi tidak memperhitungkan pengaruh kedalaman basement. Begitu pula penelitian oleh (Sintyawati, L. W. (2018) yang mengevaluasi struktur bangunan bertingkat di Jakarta menunjukkan bahwa metode pushover efektif dalam memetakan sendi plastis, tetapi tidak membahas struktur dengan konfigurasi basement yang kompleks. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang mengkaji struktur tinggi dengan basement, agar metode pushover dapat dikalibrasi lebih akurat pada tipologi bangunan tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh (Wiratmoko, B. A. 2019) pada struktur rumah sakit dengan bentuk oval menunjukkan bahwa bentuk dan ketidakteraturan geometri sangat memengaruhi distribusi gaya lateral dan kapasitas struktur. Studi tersebut belum mengakomodasi variabel kedalaman basement dan pengaruhnya terhadap kestabilan global bangunan. Selain itu, membandingkan sistem struktur SRPMK dan sistem ganda, namun hanya terbatas pada bangunan 12 lantai tanpa basement. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kesenjangan dalam literatur mengenai evaluasi struktur bertingkat tinggi dengan basement menggunakan metode pushover.

Struktur dengan basement sering kali mengalami konsentrasi tegangan yang tinggi pada level bawah, terutama akibat tekanan tanah lateral dan kondisi boundary yang lebih kaku. Analisis yang tidak mempertimbangkan kondisi ini dapat menghasilkan simpulan yang tidak representatif terhadap kondisi aktual. Hal ini diperkuat bahwa pemodelan elemen hingga diperlukan untuk menangkap perilaku lokal yang signifikan pada zona basement, tetapi belum banyak diterapkan dalam konteks pushover di Indonesia.

Penelitian ini dirancang untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan menganalisis kinerja struktur bangunan 10 lantai dan 2 basement terhadap beban gempa statik nonlinier menggunakan metode pushover. Pemodelan dilakukan dengan mengacu pada ATC-40 dan SNI 1726:2019, serta memanfaatkan perangkat lunak struktur modern seperti Robot Structural Analysis Pro untuk menghasilkan distribusi gaya, sendi plastis, dan level kinerja secara detail. Dengan demikian,

hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis dalam perancangan dan evaluasi struktur tinggi dengan konfigurasi basement yang semakin banyak dibangun di Indonesia.

Penelitian ini juga memiliki potensi kontribusi signifikan dalam aspek teoritis, yaitu memperluas cakupan penerapan metode pushover pada bangunan dengan geometri kompleks dan interaksi tanah-struktur. Di sisi praktis, hasil penelitian dapat menjadi acuan teknis bagi perencana, kontraktor, dan instansi pemerintah dalam mengevaluasi bangunan eksisting atau merancang struktur baru di wilayah rawan gempa. Mengingat bahwa banyak bangunan dengan konfigurasi serupa telah beroperasi tanpa evaluasi struktur lanjutan sejak dibangun, maka urgensi penelitian ini semakin tinggi.

Dengan latar belakang tersebut, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis kinerja struktur bangunan 10 lantai dan 2 basement dalam menghadapi beban gempa menggunakan metode pushover. Diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan kesimpulan yang komprehensif mengenai kapasitas plastis struktur, level kinerja yang dicapai, dan rekomendasi teknis untuk perbaikan atau retrofit struktur jika diperlukan. Manfaat teoretis dari penelitian ini terletak pada penguatan metodologi analisis pushover pada struktur kompleks, sedangkan manfaat praktisnya dapat diaplikasikan dalam perencanaan bangunan tahan gempa di Indonesia.

1. 2 Identifikasi Masalah

- 1 Ketidakpastian terkait kapasitas daktilitas serta kemampuan deformasi struktur bangunan 10 lantai dengan 2 lantai basement dalam menerima beban gempa statik nonlinier melalui metode pushover pada Robot Structural Analysis Pro.
- 2 Ketidakteridentifikasi pola pembentukan sendi plastis (plastic hinge formation) pada elemen-elemen struktural utama, sehingga potensi munculnya mekanisme keruntuhan yang tidak diinginkan masih sulit dievaluasi secara komprehensif.
- 3 Keterbatasan data analitis terkait posisi performance point, bentuk kurva kapasitas, serta hubungan antara capacity spectrum dan demand spectrum yang diperlukan untuk menentukan tingkat kinerja struktur.

1. 3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari skripsi ini sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pengaruh metode pushover terhadap kinerja struktur bangunan 10 lantai berdasarkan ketentuan ATC 40.
2. Sejauh mana hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Robot Structural Analysis Pro menunjukkan performa struktur terhadap parameter seismik utama seperti gaya geser dasar, simpangan maksimum, dan percepatan puncak.

1. 4 Batasan Masalah

Agar penulisan tugas akhir ini lebih terfokus dan jelas, maka ruang lingkup penelitian yang dilakukan penulis mencakup :

1. Variabel independen berupa karakteristik struktur (dimensi elemen, mutu beton, dan beban lateral), sementara variabel dependen adalah kinerja struktur terhadap gempa, ditinjau melalui kurva kapasitas, displacement target, dan tingkat kerusakan sesuai ATC-40, dan SNI 1726:2019.
2. Simulasi dan perhitungan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak

Robot Structural Analysis Pro.

3. Aspek yang dianalisis terbatas pada simpangan, kekakuan, dan gaya dalam struktur, tanpa membahas aspek biaya atau metode konstruksi.

1. 5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi pengaruh bangunan tinggi terhadap gempa menggunakan pushover.
2. Menyusun hasil studi literatur yang relevan mengenai analisis desain dinamik menggunakan Robot Structural Analysis Pro.

1. 6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian yang diharapkan penulis ini adalah :

1. Sebagai bekal atau ilmu yang dapat digunakan dalam dunia pekerjaan bagi penulis.
2. Sebagai bahan referensi bagi para peneliti dalam pengembangan pemanfaatan Robot Structural Analysis Pro untuk gedung.
3. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi mahasiswa

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Umum

Rumah susun bertingkat beton bertulang sering menjadi solusi hunian di lahan terbatas. Struktur ini rentan terhadap gempa, terutama di wilayah seperti Penajam Paser Utara yang berada di zona seismik aktif Indonesia. Evaluasi kinerja struktur terhadap gempa memerlukan pendekatan *performance-based design*, dan metode pushover adalah salah satu pendekatan yang mampu memetakan respons struktur hingga kondisi plastis. Metode ini dipadukan dengan perangkat lunak Robot Structural Analysis Pro untuk memberikan pemodelan yang realistis, analisis hinges plastis, dan kurva kapasitas-disklokasi secara detail. Teori ini membentuk dasar model variabel struktural (elemen, material, konfigurasi) berinteraksi dengan beban gempa untuk menentukan respons dan kerusakan.

Analisis pushover mengambil dampak gempa sebagai beban lateral yang bertahap pada model struktur yang dimodelkan sebagai MDOF (Multi Degree of Freedom), lalu disederhanakan ke dalam *SDOF* melalui Capacity Spectrum Method. Hal ini menciptakan pemetaan variabel instrumen (base shear, displacement, hinge formation). Kualitas hasil analisis dipengaruhi parameter masukan seperti dimensi elemen, mutu beton, dan profil beban, sehingga penelitian ini menempatkan variabel struktural sebagai variabel bebas yang secara langsung mempengaruhi variabel kinerja. Dengan demikian, metode ini sangat tepat untuk studi kuantitatif yang mengevaluasi rumah susun di daerah gempa.

2. 2 Bangunan Tahan Gempa

Bangunan tahan gempa merupakan sistem struktur yang dirancang untuk mampu menahan gaya seismik yang ditimbulkan akibat getaran tanah selama

peristiwa gempa bumi. Tujuan utamanya adalah menjaga stabilitas struktur agar tidak mengalami keruntuhan yang berakibat fatal bagi penghuninya. Prinsip utama dari perancangan bangunan tahan gempa meliputi kekakuan (*stiffness*), daktilitas (*ductility*), dan kapasitas disipasi energi (*energy dissipation capacity*) yang optimal (Arifin).

Secaras teknis, bangunan tahan gempa harus mampu berdeformasi secara plastis tanpa kehilangan kekuatan strukturalnya. Dalam konteks Indonesia yang terletak pada pertemuan tiga lempeng besar dunia (Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik), desain struktur yang memperhitungkan beban lateral akibat gempa sangat penting. Menurut Bagas, H, pendekatan berbasis rekayasa struktural (*structural engineering approach*) harus diterapkan dengan mempertimbangkan perilaku dinamis material terhadap getaran tanah. Desain ini mencakup pemilihan sistem struktur yang sesuai seperti *Special Moment Resisting Frame (SMRF)*, sistem dinding geser (*shear wall*), dan isolasi dasar (*base isolation system*).

Selain itu, penggunaan material konstruksi berkualitas tinggi seperti beton bertulang dengan kuat tekan tinggi, baja struktural yang memiliki daktilitas tinggi, serta sambungan yang fleksibel menjadi faktor kunci dalam ketahanan gempa (Nugroho, F., 2017). Konsep “*strong column-weak beam*” juga diterapkan agar deformasi dan kerusakan terfokus pada balok, bukan pada kolom utama yang berfungsi sebagai elemen penopang vertikal utama.

Dalam implementasinya, peraturan nasional seperti SNI 1726:2019 menegaskan bahwa setiap perencanaan struktur harus memperhitungkan zona seismik, karakteristik tanah, serta kategori risiko bangunan. Analisis respons dinamis dilakukan menggunakan metode *response spectrum* atau *time history*

analysis untuk memperoleh perilaku struktur secara realistis terhadap berbagai skenario gempa.

Penelitian modern juga menyoroti pentingnya adaptasi arsitektur tradisional lokal dalam mendukung ketahanan bangunan. Kusuma, V. (2018) meneliti penerapan prinsip bangunan rumah adat Joglo yang memiliki sistem atap simetris dan sambungan kayu fleksibel, yang terbukti efektif meredam gaya lateral akibat gempa. Inovasi berbasis teknologi, seperti *STEAM-based earthquake simulator*, membantu mengedukasi masyarakat dalam memahami perilaku struktur terhadap beban seismik.

Dengan demikian, penerapan prinsip bangunan tahan gempa tidak hanya menjadi aspek teknis, tetapi juga bagian dari kebijakan mitigasi bencana nasional. Integrasi antara penelitian ilmiah, regulasi teknis, dan pendekatan sosial budaya akan menciptakan sistem konstruksi yang lebih adaptif dan berkelanjutan terhadap ancaman gempa bumi di Indonesia.

2. 3 Penelitian Terdahulu

Analisis kinerja struktur bangunan menggunakan metode pushover telah menjadi pendekatan penting dalam bidang teknik sipil untuk mengevaluasi ketahanan dan kapasitas struktur terhadap beban gempa. Metode ini termasuk dalam kategori *nonlinear static analysis*, yang memberikan gambaran mengenai perilaku plastis struktur hingga mencapai batas keruntuhan. Berbeda dengan analisis linier, pendekatan ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi *performance point* dan distribusi sendi plastis yang terjadi pada elemen struktur ketika menerima gaya lateral secara bertahap.

Tinjauan terhadap penelitian terdahulu yang relevan merupakan prasyarat metodologis untuk memposisikan kontribusi penelitian ini mengenai analisis

kinerja struktur 10 lantai dengan metode *Pushover*. Studi-studi sebelumnya secara konsisten berfokus pada evaluasi kemampuan struktur untuk memenuhi persyaratan batas kinerja dan keamanan seismik yang ditetapkan oleh SNI 1726:2019 dan pedoman teknis seperti ATC-40.

Salah satu studi yang relevan, dilakukan oleh Putri dkk. (2019), mengkaji kinerja seismik pada struktur gedung beton bertulang 10 lantai menggunakan *Pushover Analysis*, yang secara langsung mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019. Penelitian tersebut berupaya memverifikasi kepatuhan struktur terhadap persyaratan batas geser dan simpangan maksimum SNI. Hasilnya mengindikasikan bahwa struktur memenuhi persyaratan keamanan dan mencapai Level Kinerja *Immediate Occupancy* (IO) berdasarkan kriteria ATC-40, yang berarti bangunan mengalami kerusakan minimum dan dapat segera digunakan kembali setelah gempa. Aspek *Level Kinerja* ini menjadi pembahasan krusial, serupa dengan studi yang dilakukan oleh Afandi (2014), yang juga mengevaluasi struktur gedung 10 lantai, namun berfokus pada besaran *drift* dan *displacement*. Penelitian Afandi (2014) menunjukkan bahwa *drift* maksimal berada di bawah batas yang diizinkan, sehingga level kinerja struktur juga diklasifikasikan sebagai IO. Kedua penelitian ini memberikan nilai pembanding empiris untuk *drift* dan *displacement* yang dapat digunakan untuk memvalidasi hasil analisis *Pushover* dalam penelitian ini.

Selain itu, penelitian dari Amrullah dkk. (2019) memberikan kerangka kerja pemodelan yang esensial, khususnya dalam implementasi prosedur *Pushover Analysis* sesuai dengan SNI 1726:2019. Mereka menjelaskan bahwa analisis *Pushover* harus dilakukan dalam dua tahap pembebanan: tahap pertama dengan beban gravitasi (kombinasi beban mati dan sebagian beban hidup) untuk

memperhitungkan kondisi non-linier, diikuti oleh tahap beban lateral dorong seismik. Penelitian tersebut penting karena bertujuan untuk mengidentifikasi mekanisme keruntuhan yang terjadi pada struktur dan membandingkannya dengan persyaratan batas simpangan. Dengan mempertimbangkan temuan dari ketiga studi terdahulu ini—mulai dari verifikasi batas simpangan, penentuan *Level Kinerja IO*, hingga prosedur pemodelan non-linier—penelitian yang diusulkan ini memiliki basis komparatif yang kuat untuk menganalisis kinerja struktur 10 lantai dengan 2 lantai *basement* secara komprehensif.

2. 4 Ketentuan Umum Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Berdasarkan SNI 1726-2019

2. 4. 1 Penentuan gempa rencana dan kategori gedung

Menilai pengaruh gempa desain sangat penting dalam perencanaan dan penilaian baik struktur bangunan maupun non-bangunan, serta berbagai komponen dan peralatan secara umum. Gempa rencana didefinisikan sebagai gempa yang memiliki kemungkinan 2% untuk terlampaui selama masa hidup struktur yang berlangsung 50 tahun.

Untuk berbagai kategori risiko yang terkait dengan struktur bangunan dan non-bangunan, dampak dari gempa desain harus disesuaikan dengan faktor pentingnya seismik.

Tabel 2. 1 Kategori risiko bangunan gedung dan nongedung 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

<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <p>Perumahan Rumah toko dan rumah kantor Pasar Gedung perkantoran Gedung apartemen/ rumah susun Pusat perbelanjaan/ mall Bangunan industri Fasilitas manufaktur Pabrik</p>	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <p>Bioskop Gedung pertemuan Stadion Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat Fasilitas penitipan anak Penjara Bangunan untuk orang jompo Gedung dan nongedung, 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</p>	III
<p>Gedung dan nongedung 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 di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <p>Bangunan-bangunan monumental Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan Rumah ibadah Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki</p>	IV

JENIS PEMANFAATAN	KATEGORI RESIKO
fasilitas bedah dan unit gawat darurat Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat	
Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, 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 Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	

Sumber: SNI 1726-2019

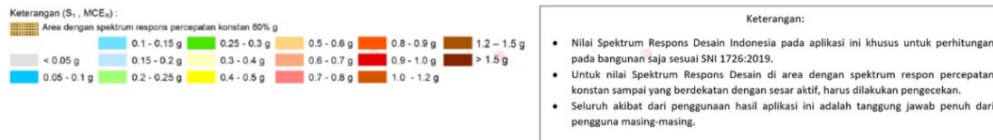
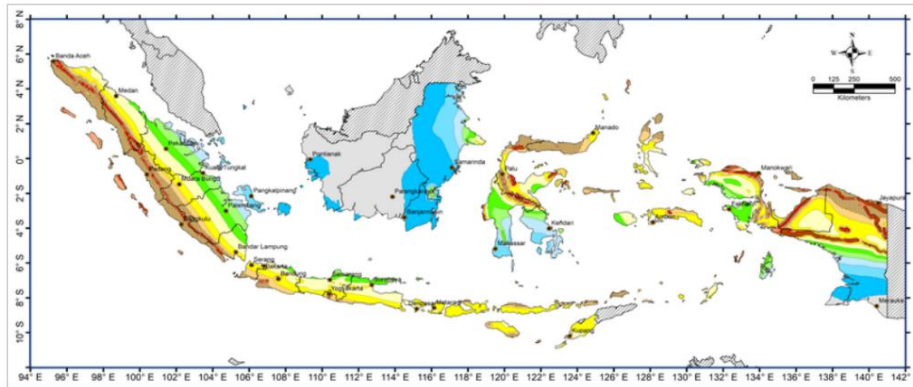
Tabel 2. 2 Faktor keutamaan gempa

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

Sumber: SNI 1726-2019

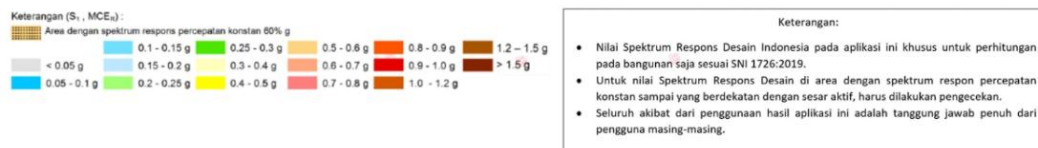
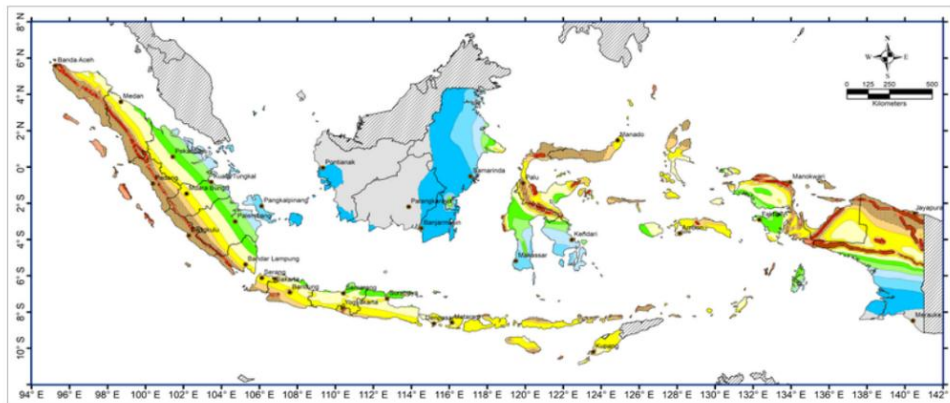
2. 4. 2 Spektrum respon desain

Spektrum respon desain parameter s_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan s_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) harus ditetapkan masing-masing dari respons spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik kemungkinan 2% telampauai dalam 50 tahun ($MCER1$ 2% dalam 50 tahun), dan dinyatakan dalam bilangan desimal terhadap percepatan gravitasi. Untuk nilai s_s dan s_1



Gambar 2. 1 Ss Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget

Sumber : Desain Spektra Indonesia



Gambar 2. 1 Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget

Gambar 2.1 menunjukkan peta untuk parameter S_s, yang merepresentasikan percepatan respons spektral dengan periode pendek (0.2 detik). Nilai S_s ini sangat penting untuk struktur yang cenderung kaku, seperti bangunan rendah atau elemen struktur yang kompak. Warna-warna yang terdapat pada peta menggambarkan intensitas S_s dalam satuan percepatan gravitasi (g). Zona merah dan oranye, yang

tampak mendominasi di sepanjang jalur patahan besar seperti di Sumatera, bagian selatan Jawa, Sulawesi, dan Papua, menunjukkan nilai S_s yang tinggi (misalnya, 0.6-0.8g atau bahkan $>1.5g$). Hal ini menunjukkan bahwa wilayah-wilayah tersebut memiliki potensi untuk mengalami guncangan gempa yang kuat dan cepat. Sementara itu, Gambar 2.2 adalah peta untuk parameter S_1 , yang menggambarkan percepatan respons spektral dengan periode panjang (1.0 detik). Nilai S_1 ini lebih krusial untuk desain bangunan tinggi atau struktur yang lebih fleksibel, karena struktur tersebut cenderung beresonansi pada periode yang lebih panjang. Pola distribusi warna pada peta S_1 juga menunjukkan konsentrasi nilai tinggi di daerah-daerah dengan aktivitas tektonik yang aktif. Meskipun terdapat kesamaan pola dengan peta S_s , terkadang terdapat perbedaan nuansa intensitas di beberapa area.

Dalam penentuan respons spektral percepatan gempa MCER di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs.

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{M1} = F_a \cdot S_1 \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCER
 terpetakan untuk periode 1,0 detik. Koefisien F_a dan F_v

Tabel 2. 3 Koefisien F_a

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)					

Tabel 2. 4 Koefisien F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_I					
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I = 0,5$	$S_I \geq 0,6$
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)					

Dua tabel yang disajikan, yaitu Tabel 2.3 Koefisien F_a dan Tabel 2.4 Koefisien F_v , merupakan elemen penting dalam perencanaan struktur tahan gempa. Koefisien-koefisien ini berfungsi untuk menyesuaikan intensitas gempa yang terukur pada batuan dasar ($MCE-R$) sesuai dengan karakteristik tanah di lokasi proyek, sebuah proses yang dikenal sebagai penyesuaian efek situs. Koefisien F_a dan F_v ini secara khusus merepresentasikan faktor amplifikasi atau atenuasi yang dialami gelombang gempa saat bergerak dari batuan dasar ke permukaan tanah. Tabel 2.3 menampilkan Koefisien F_a , atau Faktor Amplifikasi Jangka Pendek, yang diterapkan pada Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa S_s (periode 0.2 detik). Perhitungan ini sangat penting karena getaran dengan periode pendek sering

kali memiliki dampak signifikan pada struktur yang relatif kaku dan kecil. Pengguna harus mencocokkan Kelas Situs (SA hingga SF) yang diperoleh dari investigasi geoteknik dengan nilai S_s yang tertera pada peta gempa untuk menentukan nilai F_a yang tepat. Sementara itu, Tabel 2.4 menyajikan Koefisien F_v , atau Faktor Amplifikasi Jangka Panjang, yang relevan untuk Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa S_1 (periode 1.0 detik). Koefisien F_v ini penting untuk menilai respons struktur tinggi atau fleksibel, karena struktur tersebut beresonansi pada periode yang lebih panjang. Serupa dengan Tabel F_a , nilai F_v ditentukan dengan menggabungkan Kelas Situs dengan nilai S_1 yang diambil dari peta gempa. Dapat diamati bahwa, untuk Kelas Situs yang lebih lunak (seperti SD dan SE), nilai F_v bisa sangat tinggi, menyoroti risiko amplifikasi getaran periode panjang yang substansial pada lapisan tanah tebal dan lunak.

Prosedur pembuatan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019 Selanjutnya, untuk mendapatkan kurva spektrum desain harus dikembangkan dengan mengacu pada Gambar 2.3 dan mengikuti ketentuan di bawah ini:

- Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan S_{DS} .
- Untuk perioda lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a sama dengan S_{DS}
- Untuk perioda lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan desain S_a diambil berdasarkan persamaan dibawah ini

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

T = Periode getar fundamental struktur

"SDS = Parameter respons spektra percepatan desain pada periode pendek)"

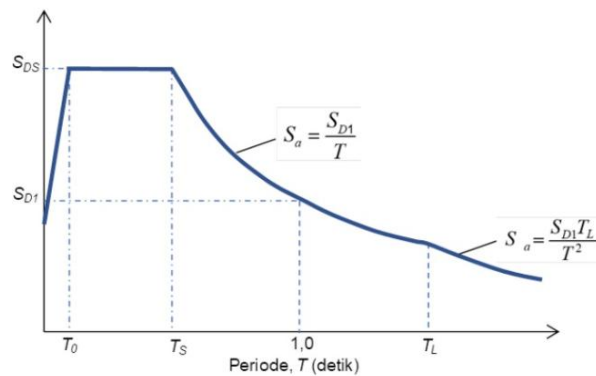
S_{D1} = Parameter respons spektra percepatan desain pada periode 1 detik

Untuk nilai T_0 dan T_s dapat ditemukan dengan kedua persamaan dibawah ini.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_1 = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (5)$$

$$T_1 = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (6)$$



Gambar 2. 2 Spektrum respons desain

Sumber : rsa.ciptakarya.pu.go.id

2. 4. 3 Kategori desain seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki kategori desain seismik tertentu. Struktur yang termasuk dalam kategori risiko I, II, atau III dan terletak di area di mana parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus diklasifikasikan sebagai struktur dengan kategori desain seismik **E**. Struktur yang tergolong dalam kategori risiko IV, yang berada di

lokasi di mana parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik **F**. Semua struktur lainnya harus dikategorikan desain seismiknya berdasarkan kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain, S_1 dan S_{D1} , sesuai dengan 0. Kategori desain seismik dapat dilihat pada tabel 5 dan 6.

Tabel 2. 5 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

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

(Sumber : SNI 1726-2019)

Tabel 2. 6 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

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

(Sumber : SNI 1726-2019)

2. 4. 4 Gaya geser dasar seismik

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

$$V = C_s W \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

C_s = koefisien respons seismik yang ditentukan

W = berat seismik efektif muncul

Perhitungan koefisien respons seismik

Perhitungan koefisien respons seismik, C_s harus ditentukan sesuai dengan persamaan dibawah ini :

$$C_s = \frac{S_{Ds}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan :

S_{Ds} = parameter percepatan respon spektral desain dalam rentang periode

R = koefisien modifikasi respons

I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan

Nilai C_s yang dihitung sesuai dengan persamaan diatas tidak perlu melebihi berikut ini :

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (9)$$

C_s harus tidak kurang dari :

$$C_s = 0,044 S_{Ds} I_{e \geq 0,001} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

S_{D1} = parameter percepatan respon spektral desain dalam rentang periode sebesar)

T = periode fundamental struktur

S_1 parameter percepatan respon spektral

a. Periode fundamental pendekatan

Periode fundamental pendekatan (T_a), dalam detik , harus ditentukan dari

persamaan dibawah ini :

$$T_a = C_t h_n^2 \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan :

h_n adalah ketinggian struktur (m) diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur, dan koefisien C_t dan x ditentukan dari tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Periode Fundamental 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

c. Distribusi vertikal gaya gempa

Gaya seismik lateral, F_x ((kN) disebarang tingkat harus ditentukan

dengan persamaan :

$$F_x = C_{vx} V \dots\dots\dots (12)$$

Dan

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan :

- C_{vx} = faktor distribusi vertikal
- V = gaya lateral desain total atau gesar didasar struktur (kN)
- w_i dan w_x = gaya lateral desain total atas gesar didasar struktur (kN) yang

ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
 h_i dan h_x = tinggi dari sampai I atau x (m)

K = ekponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai

Sebagai berikut :

Untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k = 1$

Untuk struktur dengan $T \geq 0,5$ detik, $k = 2$

Untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linear antara 1 dan 2

Distribusi horizontal gempa

Gaya geser desain gempa disemua tingkat (V_x) harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \dots\dots\dots (14)$$

Keterangan :

F_i adalah bagian dari gaya geser dasar seismik (V) yang timbul di tingkat i

V_x didistribusikan pada tingkat yang ditinjau

2.5 Metode *Pushover*

Metode *pushover* adalah analisis statik non-linear bertingkat yang memasukkan beban lateral ke model struktur hingga mencapai displacement kontrol tertentu. Tahapan ini menghasilkan kurva kapasitas (force–displacement) yang secara kuantitatif mencerminkan kekuatan, kekakuan, dan ductility struktur hingga ambang keruntuhan.

Kurva kapasitas dihasilkan dari iterasi konvergensi beban lateral pada tiap

elemen struktur, yang kemudian memetakan progresif yield dan hilangnya kekakuan. Nilai base shear maksimum dan target displacement menjadi variabel dependen kuantitatif utama yang dianalisis. Selain itu, lokasi dan jumlah plastic hinges yang terbentuk menjadi parameter penting—menunjukkan weak link dan tipping point kerusakan elemen.

Konversi kurva kapasitas ke bentuk *capacity spectrum* (format spektrum percepatan-displacement) dan identifikasi performance point dilakukan menggunakan Capacity Spectrum Method, sehingga metode pushover dapat dipetakan ke skenario gempa nyata. Pada tahap ini, variabel intermediet seperti spectral displacement dan acceleration menjadi penghubung antara hasil pushover dan spektrum gempa. Secara operasional, variabel yang muncul dari metode pushover adalah *base shear*, *roof displacement*, dan *distribusi plastic hinge*. Variable ini menjadi mediator antara input karakteristik struktur dan output level kinerja gempa berdasarkan ATC-40. Proses ini memetakan hubungan sebab-akibat yang diukur secara kuantitatif.

2.5.1 ATC-40

ATC-40 adalah pedoman yang umum digunakan dalam analisis pushover untuk mengkategorikan level kinerja struktur berdasarkan displacement target dari performance point. Level kategorinya adalah *Immediate Occupancy (IO)*, *Life Safety (LS)*, dan *Collapse Prevention (CP)*.

Tabel 2. 8 Batasan ratio drift atap ATC-40

Parameter	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	0,033

Total Drift				
Maksimum	0,005	0,005 – 0,015	Tidak Dibatasi	Tidak Dibatasi
Inelastik Drift				

2.5.2 FEMA 356

Metode koefisien perpindahan atau *Displacement Coefficient Method* (DCM) adalah metode prosedur *statis nonlinear* yang terdapat dalam dokumen FEMA 356 dengan penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respon *elastis linear* dari sistem SDOF yang setara dengan faktor koefisien C0, C1, C2 dan C3 sehingga dihitung dengan target perpindahan dengan persamaan 19, 20 berikut.

$$\delta T = CC_1C_2C_3 S_a (T_e 2/4\pi^2) g \dots\dots\dots (15)$$

Dimana :

Te = waktu getar alami yang memperhitungkan kondisi *inelastic*

C0 = koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (*first mode participation factor*) atau berdasarkan tabel FEMA356

C1 = faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan *inelastic* maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon *elastis linear* maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon 1.0 untuk $T_e \geq T_s$ dan [1,0

+ (R – 1) TS/Te]/R untuk $T_e < T_s$

TS = waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan

R = rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung

$$R = \frac{S_a}{V/w} \text{ cm} \dots\dots\dots (16)$$

Dimana :

- T_e = waktu getar alami yang memperhitungkan kondisi *inelastic*
- C_0 = koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (*first mode participation factor*) atau berdasarkan tabel FEMA356
- C_1 = faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan *inelastic* maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon *elastic linear* maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon 1.0 untuk $T_e \geq T_s$ dan $[1,0 + (R - 1) T_s/T_e]/R$ untuk $T_e < T_s$
- T_s = waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan
- R = rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung
- S_a = akselerasi respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau
- V_y = gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi *biliner*
- W = total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi
- C_m = faktor massa efektif yang diambil tabel 3.1 dari FEMA 356
- C_2 = koefisien untuk memperhitungkan efek *pinching* dari hubungan beban-beban deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan dari FEMA 356

C3 = koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta.

Koefisien diperoleh secara empiris dari studi *statistic* analisa riwayat waktu *nonlinier* dari SDOF dan diambil berdasarkan pertimbangan *engineering judgement*, dimana perilaku hubungan gaya geser dasar- lendutan pada kondisi *pasca* leleh kekakuannya gaya geser dasar-lendutan pada kondisi *pasca* leleh kekakuannya positif (kurva meningkat sedangkan jika perilaku *pasca* lelehnya negatif (kurva menurun) maka dihitung dengan persamaan 3 berikut ini.

Kriteria penerimaan komponen yang digunakan oleh FEMA 356 (2000) untuk prosedur non linier dan *deformation controlled* adalah deformasi pada titiktitik yang terdapat dalam alternatif kurva hubungan gaya dan deformasi (Δ). Kurva tersebut diperoleh dari *backbone curve* dari data pengujian. Kriteria penerimaan untuk komponen primer adalah sebagai berikut:

- a. *Immediate Occupancy*, adalah deformasi pada bagian yang permanen, yaitu kerusakan yang tampak pada saat pengujian (*experiments*) tetapi tidak lebih besar dari 0,67 kali batas deformasi untuk *Life Safety*.
- b. *Life Safety* : 0,75 kali deformasi pada titik C dalam kurva.
- c. *Collapse Prevention* : deformasi pada titik C dalam kurva, tetapi tidak lebih besar dari 0,75 kali deformasi pada titik E

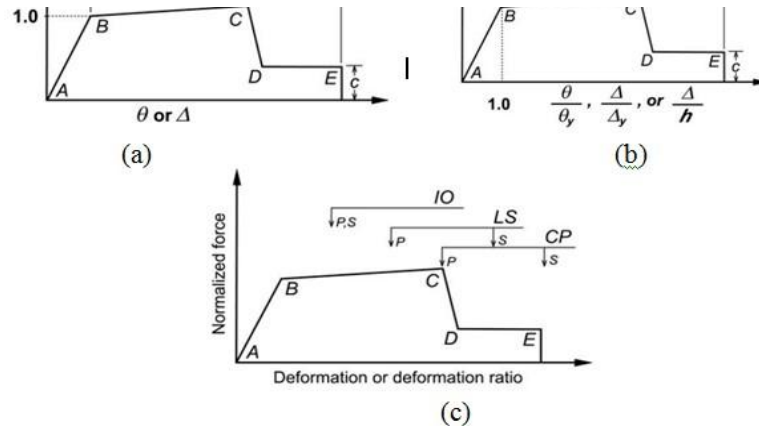
Kriteria penerimaan untuk komponen sekunder adalah sebagai berikut:

- a. *Immediate Occupancy* : penentunya sama dengan yang terdapat pada komponen primer.
- b. *Life Safety* : 75% dari deformasi pada titik E.
- c. *Collapse Prevention* : 100% dari deformasi pada titik C dalam kurva.

Hubungan antara beban dan deformasi hasil analisis menggunakan

pushover terlihat pada Gambar 2.11.

Gambar 2. 3 Hubungan beban-deformasi dan kriteria batas deformasi pada komponen: (a) Deformation, (b) Deformation ratio, (c) Component or element deformation acceptance criteria (FEMA 356, 2000).



Sumber : <https://protasoftware.com/white-paper/target-displacement-pushover-fema-356/>

2. 5. 3 Drift Rasio

Drift rasio atau *interstory drift ratio* adalah parameter penting dalam menilai respons lateral suatu bangunan terhadap beban gempa. Drift ini menunjukkan perbandingan antara perpindahan relatif antar lantai dengan tinggi lantai tersebut. Nilai ini menjadi indikator utama dalam mengevaluasi deformasi struktur dan merupakan acuan dalam menetapkan tingkat kinerja bangunan pada analisis berbasis kinerja (*performance-based design*) (Chopra, 2012).

Konsep drift rasio berakar pada kebutuhan untuk mengukur deformasi inelastik suatu struktur secara lokal. Meskipun gaya dalam dan percepatan juga diperhitungkan dalam analisis gempa, drift rasio sering dianggap lebih representatif terhadap kerusakan aktual pada elemen non-struktural dan struktural, seperti dinding pengisi dan sambungan antar elemen (ATC-40, 1996). Nilai drift yang besar dapat menyebabkan kerusakan serius meskipun gaya dasar gempa tidak ekstrem.

Dimana Δ adalah perpindahan relatif antar dua lantai dan h adalah tinggi

lantai. Nilai ini umumnya dinyatakan dalam satuan persen (%). Sebagai contoh, jika suatu lantai bergeser 30 mm terhadap lantai di bawahnya dengan tinggi lantai 3 m, maka drift rasionya adalah 1% (Akhatar & Vecchio, 2002).

Dalam konteks evaluasi struktur berdasarkan kinerja, berbagai pedoman dan kode seperti FEMA 356 dan ATC-40 menetapkan batasan-batasan tertentu terhadap drift rasio. Misalnya, untuk bangunan baru, drift maksimum yang diizinkan pada kondisi batas aman (IO–Immediate Occupancy) adalah sekitar 0.7%, sedangkan untuk kondisi kinerja *Life Safety* dapat mencapai 2% dan *Collapse Prevention* hingga 4% (FEMA, 2000). Nilai-nilai ini sangat penting dalam desain struktur tahan gempa.

2.5.4 Displacement

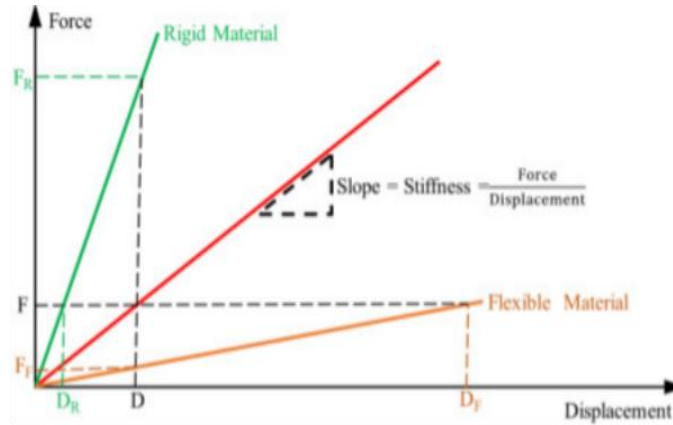
Displacement merupakan salah satu parameter utama dalam analisis struktur yang menunjukkan perubahan posisi titik dalam suatu struktur akibat beban yang bekerja. Dalam konteks rekayasa struktur, displacement umumnya merujuk pada perpindahan titik-titik struktur dari posisi semula akibat gaya luar, seperti beban mati, beban hidup, angin, dan terutama beban gempa (Chopra, 2012). Perpindahan ini sangat penting karena menentukan sejauh mana struktur mampu mengalami deformasi tanpa kehilangan fungsi atau stabilitasnya.

Terdapat beberapa jenis displacement yang umumnya dianalisis dalam teknik sipil, yaitu translasi horizontal, translasi vertikal, dan rotasi. Pada bangunan tahan gempa, fokus utama adalah translasi lateral karena gaya gempa bekerja secara horizontal. *Displacement* lateral ini menjadi indikator awal perilaku dinamis struktur serta menjadi acuan dalam desain berbasis perpindahan (*displacement based design*) (Priestley et al., 2007).

Dalam metode analisis linear elastik, displacement dihitung berdasarkan hubungan antara kekakuan elemen struktur dan gaya eksternal yang dikenakan. Namun, untuk struktur yang memasuki kondisi non-linear, *displacement* juga mencakup deformasi plastis dan inelastik. Oleh karena itu, dalam analisis performa struktur terhadap gempa, displacement lebih representatif dibanding gaya, terutama dalam mengevaluasi kerusakan pasca-gempa (FEMA, 2000).

Displacement maksimum pada struktur merupakan indikator kapasitas deformasi. Dalam sistem struktur tahan gempa, seperti sistem rangka pemikul momen atau dinding geser, displacement yang besar menandakan kemampuan struktur untuk menyerap energi gempa melalui deformasi plastis (Paulay &

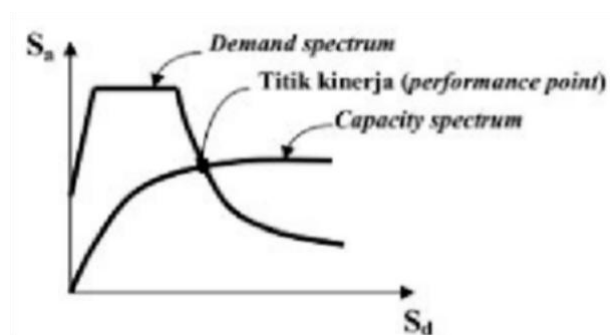
Priestley, 1992). Sistem struktur dirancang untuk memiliki daktalitas tinggi agar tetap berdiri meskipun telah mengalami displacement signifikan.



Gambar 2. 4 Displacement

2. 5. 5 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas atau *capacity curve* merupakan representasi grafis dari hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*roof displacement*) yang diperoleh dari analisis statik non-linier atau pushover. Kurva ini menggambarkan respons struktur terhadap beban lateral yang meningkat secara bertahap hingga mencapai kondisi runtuh (Chopra, 2012). Dengan memanfaatkan kurva kapasitas, insinyur dapat mengevaluasi kemampuan struktur untuk menyerap energi gempa melalui deformasi inelastik.



Gambar 2. 5 Kurva Kapasitas

Sumber : Applied Technology Council, Report ATC-40, (Redwood City : ATC, 1

Metode ini cukup sederhana; namun, informasi yang digunakan sangat berharga karena secara efektif menggambarkan respons inelastis dari struktur. Meskipun analisis ini bukan pendekatan terbaik untuk menangani masalah yang berkaitan dengan analisis dan desain, metode ini relatif mudah untuk memperoleh

$$S_a = \frac{v/w}{\alpha_1} \dots\dots\dots (17)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF1\phi_{roof,1}} \dots\dots\dots (18)$$

$$PF = \frac{[\sum_i^N 1(w_i\phi_{i1})/g]}{[\sum_i^N 1(w_i\phi_{i1}^2)/g]} \dots\dots\dots (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_i^N 1(w_i\phi_{i1})/g]^2}{[\sum_i^N 1(w_i)/g][\sum_i^N 1(w_i\phi_{i1}^2)/g]} \dots\dots\dots (20)$$

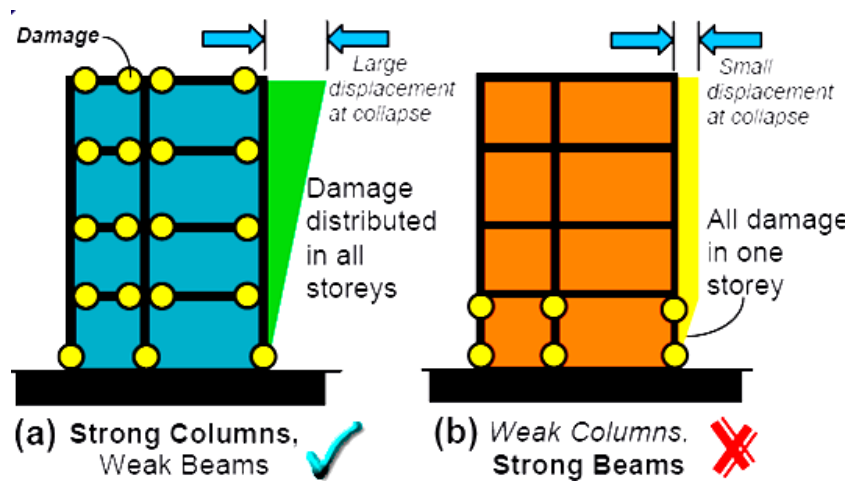
Dimana :

- Sa = Spectral acceleration
- Sd = Spectral displacement
- PF1 = modal participation untuk model pertama
- a1 = modal mass coefficient untuk model pertama
- Aeil = amplitude of first untuk level i
- V = gaya geser dasar
- W = berat mati bangunan ditambah beban hidup
- Δ = roof displacement
- Wi/g = massa pada level i

2. 5. 6 Sendi Plastis

Tegangan akan terjadi pada suatu elemen struktur sederhana dikenai sebuah gaya atau banyak gaya. Jika gaya-gaya yang dikenai ditingkatkan, maka tegangantegangan yang terjadi pada tampang juga akan meningkat. Pada suatu saat, gayagaya yang didukung sudah tidak dapat ditingkatkan lagi jika pada seluruh tampang telah tercapai tegangan lelehnya. Pada keadaan demikian, tampang akan terdefleksi atau berotasi terus (*plastic flow*) pada gaya yang konstan. Daerah dimana tampang sudah tidak mampu lagi menahan kenaikan gaya yang lebih besar disebut sendi plastis (*plastic hinges*). Sendi plastis dapat terjadi pada suatu struktur portal berderajat kebebasan banyak MDOF (*Multi Degree of Freedom*).

Ketika suatu gedung dilanda gempa yang cukup besar, akan timbul momen- momen pada balok atau kolomnya. Apabila besar dari momen- momen tersebut melampaui besar momen kapasitas balok atau kolom portal, maka terjadi sendi plastis pada balok atau kolom ditandai dengan melelehnya tulangan baja. Sendi plastis terjadi secara bertahap sampai bangunan gedung tersebut runtuh



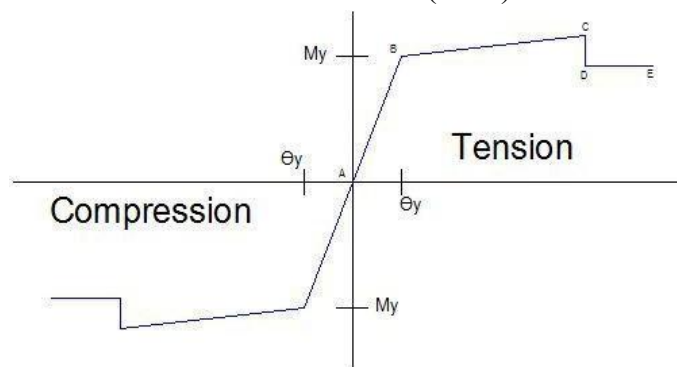
Gambar 2. 6 Kemungkinan pola terbentuknya sendi plastis

Sumber : <https://hesa.co.id/konsep-daktilitas-pada-struktur-bangunan/>

Ada dua kemungkinan pola terbentuknya sendi plastis, yaitu:

- Sendi-plastis terjadi pada balok. Pola ini tidak begitu berbahaya karena tidak ada efek $P-\Delta$ (sangat kecil), sehingga diperlukan banyak sendi-plastis untuk mencapai taraf keruntuhan bangunan.
- Sendi-plastis terjadi pada kolom. Bila pola ini terjadi maka keadaan menjadi berbahaya karena ada efek $P-\Delta$ (Gambar 2.7 dibawah).

Sumber : FEMA 273 (1997)



Gambar 2. 7 Default sendi plastis M3 dan P-MM.

Pemodelan sendi digunakan untuk mendefinisikan perilaku non linier *force-displacement* dan atau momen rotasi yang dapat ditempatkan pada beberapa tempat berbeda sepanjang bentang balok atau kolom pemodelan sendi adalah *rigid* dan tidak memiliki efek perilaku linier pada *member*.

Dalam analisa elemen kolom menggunakan tipe sendi *default* P-MM dengan mempertimbangkan kolom mendapat gaya aksial dan momen, sedangkan balok tipe sendi *default* M3 dengan mempertimbangkan balok menahan momen pada sumbu kuat (Gambar 2.13). Nilai yang tertera pada kriteria penerimaan untuk *Immediate Occupancy, Life Safety*, serta *Collapse Prevention*, merupakan nilai yang diambil berdasarkan FEMA 356 (2000).

2.6 Robot Structural Analysis Professional

Building Information Modeling (BIM) adalah suatu paradigma yang mulai berkembang dalam sektor konstruksi, yang mampu mengintegrasikan semua pemangku kepentingan yang terlibat dalam proses konstruksi, sehingga menghasilkan hasil yang lebih optimal.

BIM merupakan sistem teknologi yang mengandung informasi yang saling terhubung (terintegrasi) dalam tahapan perencanaan (Desain), pelaksanaan (Konstruksi), dan pemeliharaan (Perawatan) yang disajikan dalam bentuk visualisasi 3D (Hasyim et al., n.d.)

Autodesk Robot Structural Analysis Professional (RSAP) merupakan perangkat lunak analisis struktur yang dikembangkan oleh Autodesk untuk membantu insinyur sipil dalam menganalisis dan merancang struktur bangunan secara linear maupun non-linear. RSAP mendukung berbagai jenis analisis termasuk analisis respons dinamis terhadap beban gempa dan sangat kompatibel

dengan standar-standar internasional seperti Eurocode, ASCE 7, dan SNI 1726:2019.



Gambar 2. 8 Robot Structural Analysis Pro

Sumber : <https://forums.autodesk.com/t5/robot-structural-analysis-forum/>

Menurut (Silitonga & Bektaş, 2024) dalam jurnal mereka berjudul *Seismic Performance and Sustainability of Reinforced Concrete Buildings: A Comprehensive Assessment*, penggunaan RSAP terbukti efektif dalam mengevaluasi kinerja seismik bangunan dengan pendekatan realistis terhadap kondisi batas, pembebanan dinamis, dan interaksi antar elemen struktur. Mereka menunjukkan bahwa RSAP memberikan hasil analisis yang dapat diandalkan, terutama bila dikombinasikan dengan analisis lanjutan berbasis ATC-40, SNI 1726-2019.

Dengan dukungan dari standar seismik terbaru seperti SNI 1726:2019, RSAP dapat disesuaikan untuk menyimulasikan spektrum respons desain gempa di Indonesia. Ini menjadikan RSAP sebagai alat penting dalam evaluasi dan optimasi desain bangunan tahan gempa di wilayah seismik aktif seperti Indonesia.

Penggunaan Robot Structural Analysis Professional (RSA Pro) dalam analisis pushover dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis untuk memastikan model struktur dapat merepresentasikan perilaku nonlinier secara akurat. Tahap pertama adalah pembuatan model tiga dimensi yang mencakup

pendefinisian grid, elemen balok, kolom, pelat lantai, serta material beton dan baja sesuai mutu rencana. Selanjutnya, pengguna menetapkan parameter seksional (section properties) pada setiap elemen struktur dan melakukan pengecekan konektivitas agar analisis dapat berjalan tanpa error.

Tahap kedua adalah penerapan beban awal yang meliputi beban mati, beban hidup, dan kombinasi beban gravitasional sesuai ketentuan SNI 1727:2020. Pembebanan ini penting karena pushover dilakukan setelah struktur berada dalam kondisi beban awal seperti keadaan nyata. RSA Pro kemudian digunakan untuk mendefinisikan beban gempa statik ekuivalen berdasarkan ASCE 7-16 atau SNI 1726:2019 pada arah X dan Y, yang nantinya menjadi dasar pembentukan pola beban lateral (*pushover load pattern*).

Tahap ketiga adalah pengaturan analisis nonlinier. Pengguna mengaktifkan menu *Pushover Analysis* dengan memilih tipe sendi plastis (hinge properties) yang umumnya mengacu pada FEMA 356 atau ATC-40. Setiap elemen balok dan kolom diberikan sendi plastis di lokasi tertentu, terutama pada ujung elemen, untuk memodelkan rotasi plastis saat struktur menerima beban berlebih.

Tahap keempat adalah menjalankan proses analisis. RSA Pro akan menerapkan beban lateral secara bertahap (incremental) hingga struktur mencapai kondisi maksimum atau kegagalan numerik. Hasil analisis meliputi kurva kapasitas (base shear–displacement), distribusi sendi plastis, dan titik kinerja (performance point) yang dihitung melalui Capacity Spectrum Method.

Tahap terakhir adalah interpretasi hasil, yaitu membandingkan

displacement target, rasio drift, dan level kinerja struktur terhadap kriteria ATC-40 atau FEMA 356. Keseluruhan langkah ini memungkinkan evaluasi perilaku inelastik struktur secara menyeluruh dan menjadi dasar penentuan tingkat keamanan bangunan terhadap gempa.

2.7 Pembebanan Struktur

SNI 1727:2020 merupakan standar nasional terbaru di Indonesia yang mengatur beban desain minimum untuk bangunan gedung, menggantikan SNI 1727:2013 (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Revisi ini mensyaratkan penyesuaian menyeluruh pada proses perancangan struktur, terutama dalam hal klasifikasi beban, kombinasi pembebanan, dan penggunaan koefisien lingkungan yang lebih relevan dengan kondisi lokal.

Secara praktis, perubahan ini berdampak nyata pada dimensi struktural, penelitian menunjukkan bahwa implementasi ketentuan SNI 1727:2020 cenderung menghasilkan peningkatan dimensi balok dan kolom dibandingkan dengan versi sebelumnya, yang mengindikasikan adanya perhitungan beban mati yang lebih konservatif (Putri, Khala, & Prayogi, 2022). Penerapan kombinasi beban menurut standar baru ini telah terbukti mampu menjamin kapasitas momen nominal yang memadai, sehingga keamanan struktur untuk proyek perumahan vertikal dapat terpenuhi (Proklamalatu & Larasati, 2025).

Pada aspek beban angin, standar 2020 merevisi koefisien elevasi dan kategori risiko, yang berujung pada perhitungan tekanan angin yang lebih ketat untuk beberapa jenis struktur. Hal ini mengharuskan verifikasi ulang desain pada elemen-elemen seperti rangka ruang dan fasad (Tarigan, Tarigan, & Nursyamsi, *et*

al.). Selain itu, analisis pada struktur beton bertulang menunjukkan bahwa kombinasi beban ekstrem—terutama antara beban gempa (mengacu SNI 1726:2019) dan beban angin—dapat mendekati batas desain, menekankan perlunya tinjauan detail pada kekakuan dan penulangan elemen (Pratama & Walujodjati, 2023).

Implikasi lain yang signifikan adalah pada struktur eksisting. Evaluasi ulang terhadap bangunan lama menggunakan acuan SNI 1727:2020 kerap menunjukkan penurunan tingkat kinerja struktural. Oleh karena itu, pembaruan standar ini tidak hanya memengaruhi desain baru, tetapi juga menuntut evaluasi dan, jika perlu, retrofitting bagi struktur eksisting agar tetap memenuhi kriteria keselamatan terbaru (Khala, Basyaruddin, & Dharmawan, 2022)

Implikasi lain yang signifikan adalah pada struktur eksisting. Evaluasi ulang terhadap bangunan lama menggunakan acuan SNI 1727:2020 kerap menunjukkan penurunan tingkat kinerja struktural. Oleh karena itu, pembaruan standar ini tidak hanya memengaruhi desain baru, tetapi juga menuntut evaluasi dan, jika perlu, retrofitting bagi struktur eksisting agar tetap memenuhi kriteria keselamatan terbaru (Khala, Basyaruddin, & Dharmawan, 2022).

2. 7. 1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang bersifat tetap berupa kolom, balok, dinding dan juga termasuk segala unsur tambahan segala unsur tambahan finishing, mesin-mesin serta peralatan- peralatan tetap yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari gedung tersebut. Besaran beban mati untuk bangunan gedung dilihat pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10.

Tabel 2. 9 Berat Material Kontruksi

Beban Mati	Besarnya Beban
Beton Bertulang	2400 kg/m ³
Baja	7850 kg/m ³

Sumber : SNI 1727 -2020

Tabel 2. 10 Berat tambahan komponen gedung

Beban Mati	Besarnya Beban
Plafon dan penggantung	18 kg/m ²
Adukan/cm dari semen	21 kg/m ²
Adukan/cm dari pasir	16 kg/m ²
Penutup lantai dari keramik	24 kg/m ²
M&E	60 kg/m ²
Waterproof	4 kg/m ²
Pasangan bata setengah batu	250 kg/m ²

Sumber : SNI 1727 -2020

Beban mati pada perencanaan ini terdiri dari berat sendiri struktur dan beban mati tambahan yang dijelaskan pada item-item berikut ini :

- Berat Sendiri

Berat sendiri merupakan berat dari komponen struktur secara keseluruhan tidak termasuk segala unsur tambahan yang tidak memikul beban. Perhitungan berat sendiri telah dihitung secara otomatis oleh program analisis struktur.

- Beban Tambahan Pelat Lantai

Pada pelat lantai terdapat beban mati tambahan. Beban ini berupa keramik lantai, adukan semen dari spesi antara pelat dengan keramik, plafon beserta penggantungnya dan mechanical engineering dan lain-lain.

- Beban Dinding

Pada perencanaan, dinding bukanlah komponen dari struktur (kecuali

dinding struktural) karena dia tidak memikul beban, sehingga dinding dibuat sebagai beban tambahan. Beban dinding dijadikan sebagai beban garis yang ditumpu pada balok- balok yang berhubungan pada masing- masing lantai. Pada perencanaan ini beban dinding hanya diletakkan pada balok- balok terluar saja, karena dinding bagian dalam menggunakan partisi.

2. 7. 2 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban yang disebabkan oleh penggunaan maupun hunian dan beban ini bisa ada atau tidak ada pada struktur pada waktu tertentu. Secara umum beban ini bekerja dengan arah vertikal ke bawah, tetapi terkadang dapat juga berarah horizontal. Semua beban hidup mempunyai karakteristik dapat bergerak atau berpindah.

Tabel 2. 11 Beban Hidup

Hunian atau penggunaan	Merata Psf (kN/m ²)	Terpusat Lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)		
Sistem lantai akses		
Ruang kantor	50 (2,4)	2000 (8,9)
Ruang komputer	100 (4,79)	2000 (8,9)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	150 (7,18) ^a	
Ruang pertemuan		
Kursi tetap (terikat di lantai)	100 (4,79) ^a	
Lobi	100 (4,79) ^a	
Kursi dapat dipindahan	100 (4,79) ^a	
Panggung pertemuan	100 (4,79) ^a	
Lantai podium	150 (7,18) ^a	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 KN/m ²)	
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	300 (1,33)

Koridor Lantai pertama Lantai lain	100 (4,79) sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79) ^a	
Hunian (lihat rumah tinggal)		
Ruang mesin elevator (pada daerah 2 in.x 2 in. [50 mmx50mm])		300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai finishing ringan (pada area 1 in.x 1 in.[25 mm x 25 mm])		200 (0,89)
Jalur penyelamatan terhadap kebakaran Hunian satu keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	
Tangga permanen	Lihat pasal 4.5	
Garasi/Parkir Mobil penumpang saja Truk dan bus	40 (1,92) ^{abc}	
Hunian atau penggunaan	Merata Psf (kN/m ²)	Terpusat Lb (kN)
Susunan tangga, rel pengaman dan batang pegangan	Lihat pasal 4.5	
Helipad	60 (2,87) ^{de} tidak boleh direduksi	
Rumah sakit Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor diatas lantai pertama	60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Hotel (lihat rumah tinggal)		
Perpustakaan Ruang baca Ruang penyimpanan Koridor di atas lantai pertama	60 (2,87) 150 (7,18) ^a 80 (3,83)	1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Pabrik Ringan Berat	125 (6,00) ^a 250 (11,97) ^a	2000 (8,90) 3000 (13,4)

Gedung perkantoran: Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian Lobi dan koridor lantai pertama Kantor Koridor di atas lantai pertama	100 (4,79) 50 (2,40) 80 (3,83)	2000 (8,90) 2000 (8,90) 2000 (8,90)
Lembaga hukum Blok sel Koridor	40 (1,92) 100 (4,79)	
Tempat rekreasi Tempat bowling, kolam renang, dan penggunaan yang sama Bangsal dansa dan Ruang dansa Gimnasium Tempat menonton baik terbuka atau tertutup Stadium dan tribun/arena dengan tempat duduk tetap (terikat pada lantai)	75 (3,59) ^a 100 (4,79) ^a 100 (4,79) ^a 100 (4,79) ^{ak} 60 (2,87) ^{ak}	
Hunian atau penggunaan	Merata Psf (kN/m ²)	Terpusat Lb (kN)
Rumah tinggal	10 (0,48) ⁱ 20 (0,96) ^m 30 (1,44) 40 (1,92) 40 (1,92) 100 (4,79)	
Hunian (satu keluarga dan dua keluarga)	-	-
Loteng yang tidak dapat didiamin	-	-

tanpa gudang	-	-
Loteng yang tidak dapat didiamin	-	-
dengan gudang	-	-
Loteng yang dapat didiami dan ruang	-	-
tidur	-	-
Semua ruang kecuali tangga dan	-	-
balkon	-	-
Semua hunian rumah tinggal lainnya	-	-
Rumah pribadi dan koridor yang	-	-
melayani mereka	-	-
Ruang publik ^a dan koridor yang melayani	-	-
mereka	-	-
Atap Atap datar, berbubung, dan lengkung Atap digunakan untuk taman atap Atap yang digunakan untuk tujuan lain	20 (0,96) ⁿ 100 (4,79) Sama seperti hunian dilayani	-

Atap yang digunakan untuk hunian lainnya Awning dan kanopi		-
Konstruksi pabrik yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	5 (0,24) tidak boleh direduksi	
Rangka tumpu layar penuh	5 (0,24) tidak	-
	boleh direduksi	-
	dan berdasarkan	-
	luas tributari	-
	dari atap yang	-
	ditumpu oleh	-
	rangka	-
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	-
Komponen struktur atap utama, yang	-	
terhubung langsung dengan pekerjaan lantai	-	-
Titik panel tunggal dari batang bawah	-	200 (0,89)
ranga atap atau setiap titik sepanjang	-	-

komponen struktur utama yang	-	-
mendukung atap diatas pabrik, gudang,	-	2000 (8,9)
dan perbaikan garasi	-	-
Semua komponen struktur atap utama	-	300 (1,33)
lainnya	-	-
Semua permukaan atap dengan beban	-	300 (1,33)
pekerja pemeliharaan	-	
Sekolah	-	-
Ruang kelas	40 (1,92)	1000 (4,5)
Koridor diatas lantai pertama	80 (3,83)	1000 (4,5)
Koridor lantai pertama	100 (4,79)	1000 (4,5)
Bak-bak/scuttles, rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses	--	200 (0,89)
Pinggir jalan untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	250 (11,97) ^{ap}	8000 (35,6)

Tangga dan jalan keluar	100 (4,79)	300 ^r
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	40 (1,92)	300 ^r
	-	-
Gudang diatas langit-langit	20 (0,96)	-
Gudang penyimpanan barang sebelum disalurkan ke pengecer (jika diantisipasi menjadi gudang penyimpanan, harus dirancang untuk beban lebih berat)	-	-
	-	-
Ringan	125 (6,00) ^a	-
Berat	250 (11,97) ^a	-
Toko	-	-
Eceran Lantai pertama	100 (4,79)	1000 (4,45)
Lantai diatasnya	75 (3,59)	1000 (4,45)
Grosir, di semua lantai	125 (6,00) ^a	1000 (4,45)

Penghalang kendaraan	Lihat pasal 4,5	-
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	60 (2,87)	-
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79) ^a	-

Sumber : SNI 1727-2020

- Reduksi beban hidup merata
 - Untuk struktur dengan $KLLAT \geq 37,16 m^2$
 - $L \geq 4,79 kN/m^2$, garasi mobil penumpang dan tempat pertemuan boleh direduksi
 - Beban hidup tereduksi dihitung dengan Pers. 2.12.
$$L = L_0 \left(0,25 + \frac{4,57}{\sqrt{K_{LL} A_T}} \right) \quad (19)$$

$L \geq 0,50 L_0$ – Komponen struktur penyangga 1 lantai

$L \geq 0,40 L_0$ – Komponen struktur penyangga ≥ 2 lantai

Tabel 2. 12 Faktor elemen beban hidup

Elemen	K_{LL}^a
Kolom-kolom interior	4
Kolom-kolom eksterior tanpa pelat kantilever	4
Kolom-kolom tepi dengan pelat kantilever	3
Kolom-kolom sudut dengan pelat kantilever	2
Balok-balok tepi tanpa pelat-pelat kantilever	2
Balok-balok interior	2

Semua komponen struktur yang tidak disebut di atas: Balok-balok tepi dengan pelat-pelat kantilever Balok-balok kantilever Pelat-pelat satu arah Komponen struktur tanpa ketentuan-ketentuan untuk penyaluran Geser menerus tegak lurus terhadap bentangnya	1
---	---

Sumber : SNI 1727-2020

2. 7. 3 Beban Angin

Beban angin (Wind Load) merupakan salah satu aksi horizontal yang esensial dalam analisis perancangan struktur bangunan bertingkat tinggi, mengingat potensi signifikannya dalam menimbulkan gaya lateral dan ketidaknyamanan operasional (*serviceability*) (Turangan dkk., 2024). Dalam konteks rekayasa struktural di Indonesia, penentuan besaran dan distribusi beban angin telah diatur secara komprehensif melalui SNI 1727:2020 dengan judul Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2020). Standar nasional ini mengadopsi prosedur pembebanan angin dari standar internasional ASCE 7-16 dan secara spesifik mencakup metodologi perhitungan untuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) maupun komponen non-struktural seperti *cladding* (Darmansyah dkk., 2025). Menurut SNI 1727:2020 Pasal 26, perhitungan beban angin didasarkan pada tekanan velositas (qz) pada ketinggian tertentu (z), yang dievaluasi dengan persamaan.

Tabel 26.6-1 - Faktor arah angin, K_d

Tipe struktur	Faktor arah angin K_d
Bangunan gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah berbentuk bundar	1,0 ^a
Cerobong, tangki, dan struktur serupa	0,90
Persegi	0,95
Segi enam	1,0 ^a
Segi delapan	1,0 ^a
Bundar	
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka batang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

^aFaktor arah angin $K_d = 0,95$ diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan dengan sistem struktur non-asimetris.

Gambar 2. 9 Faktor arah angin

Sumber : SNI 1727-2020

Prosedur perhitungan beban angin dalam SNI 1727:2020 Bab 26 didasarkan pada perhitungan tekanan velositas (qz), yang merupakan fungsi dari variabel lokasi dan karakteristik bangunan (Darmansyah dkk., 2025). Penentuan tekanan velositas (qz) memerlukan input parameter kunci, termasuk Kecepatan Angin Dasar (V)— yang disesuaikan berdasarkan data BMKG setempat (Turangan dkk., 2024)— Faktor Arah Angin ($K_d=0,85$), dan Faktor Efek Hembusan ($G=0,85$) untuk struktur kaku (SNI 1727:2020 Pasal 26.11.1). Selain itu, Koefisien Eksposur Tekanan Velositas (K_z) pada setiap tingkat elevasi wajib ditentukan berdasarkan Kategori Eksposur lahan (misalnya Eksposur C) (Darmansyah dkk., 2025). Tekanan velositas (qz) ini kemudian ditransformasikan menjadi tekanan angin desain (P) pada permukaan bangunan.

Metode yang paling relevan untuk bangunan gedung kaku adalah Metode Koefisien Tekanan (Pasal 27.3.2 SNI 1727:2020) (Darmansyah dkk., 2025). Dalam metode ini, tekanan angin (P) dihitung dari perbedaan antara tekanan eksternal

$(q \cdot G \cdot C_p)$ dan tekanan internal ($q \cdot G C_{pi}$) (Darmansyah dkk., 2025). Sebagai referensi, Koefisien Tekanan Eksternal (C_p) pada dinding sisi datang umumnya diasumsikan +0,8, sedangkan Koefisien Tekanan Internal ($G C_{pi}$) untuk gedung tertutup adalah $\pm 0,18$ (Darmansyah dkk., 2025). Perlu ditekankan bahwa SNI 1727:2020 Pasal 27.1.5 menetapkan bahwa beban angin yang digunakan untuk desain SPGAU tidak boleh kurang dari beban minimum $0,38 \text{ kN/m}^2$ yang terproyeksikan pada luasan vertikal (BSN, 2020). Oleh karena itu, penerapan metodologi SNI 1727:2020 secara sistematis merupakan prasyarat fundamental untuk menjamin stabilitas dan keamanan fungsional struktur terhadap beban.