

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deskripsi Umum

Analisis kinerja struktur gedung adalah proses evaluasi sistematis yang dilakukan untuk menilai kinerja dan kondisi suatu struktur gedung terhadap beban gempa. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk memastikan bahwa struktur gedung tetap aman, stabil, dan dapat memenuhi kebutuhan pengguna selama masa operasionalnya. Evaluasi kinerja struktur pada gedung bertingkat bertujuan untuk memenuhi jaminan kenyamanan dan keamanan (Rifai et al., 2022).

Menurut (Tri Mulyono, 2004), beton bertulang adalah beton yang menggunakan tulangan dengan jumlah dan luas tulangan tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan, dengan atau tanpa pratekan dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja.

Beton bertulang merupakan bahan konstruksi yang paling penting dan paling banyak digunakan. Beton bertulang digunakan pada semua jenis struktur besar maupun struktur kecil seperti bangunan, jembatan, perkerasan jalan, bendungan, dinding penahan tanah, terowongan, jembatan yang melintasi lembah (*viaduct*), drainase serta fasilitas irigasi, tangki, dan sebagainya (McCormac, 2004)

2.2 Analisis Dinamik Struktur

Analisis dinamik struktur adalah suatu proses untuk menentukan respons struktur terhadap beban yang berubah terhadap waktu (Chopra, 1995). Gelombang tidak selalu tampak sama dan juga tidak selalu merambat ke arah yang sama (Yusep Ramdani et al., 2023). Analisis dinamik pada struktur dilakukan dengan tujuan untuk evaluasi lebih akurat terhadap gaya-gaya gempa yang bekerja pada struktur dan untuk mengetahui perilaku dari struktur akibat dari pengaruh beban dinamik (beban gempa dan beban angin). Analisis ini dapat dilakukan dengan cara elastis dan inelastis.

Pada cara elastis dapat dibedakan menjadi Analisis Ragam Riwayat Waktu (Time History Modal Analysis) yang memerlukan rekaman percepatan gempa dan

Analisis Ragam Spektrum Respon (Respons Spectrum Modal Analysis) dimana respon maksimum dari setiap ragam getar yang terjadi diperoleh dari Spektrum Respon Rencana (*Design Spectra*).

2.3 Respon Dinamik pada Struktur

2.3.1 Respon Struktur Arah Vertikal

Pada struktur yang mendapat beban lateral (gempa), maka struktur akan memberikan respon terhadap beban tersebut. Struktur dengan aspek rasio vertikal besar berpengaruh terhadap respon struktur menahan gaya lateral (Tarigan et al., 2023). Pada setiap level lantai, struktur akan menerima gaya horizontal dan *overturning moment* karena pada kondisi ini struktur gedung cenderung berperilaku seperti elemen kantilever vertikal. Kemudian, momen dan gaya pada setiap lantai tersebut akan disalurkan ke bagian dasar gedung dan akan dipikul oleh struktur fondasi. Respon yang diberikan oleh struktur bergantung pada kekuatan struktur tersebut sehingga pergerakan terhadap beban gempa bisa diperhitungkan.

2.3.2 Respon Struktur Arah Horizontal

Faktor yang harus diperhatikan dalam perencanaan struktur tahan gempa adalah terjadinya momen torsi pada elemen bangunan. Hal ini terjadi disebabkan adanya eksentrisitas antara pusat massa bangunan (*center of mass*) dengan pusat torsi/pusat kekakuan (*center of rigidity*).

Center of Mass (CM) adalah titik tangkap resultan beban gravitasi yang bekerja pada lantai tingkat tersebut, sedangkan *Center of Rigidity* (CR) adalah titik pada suatu lantai bangunan yang apabila gaya horizontal bekerja pada titik tersebut tidak mengalami rotasi, tetapi hanya mengalami translasi.

Letak titik pusat massa (CM) dan titik pusat kekakuan (CR) suatu gedung tidak selalu terletak pada tempat yang sama meskipun pada struktur yang beraturan. Jarak antara CM dan CR harus diperhatikan dalam mendesain struktur gedung yang akan direncanakan. Letak CM setidaknya harus berjarak 5% terhadap lebar bangunan dari CR. Jarak 5% tersebut digunakan meskipun pada gedung yang tidak

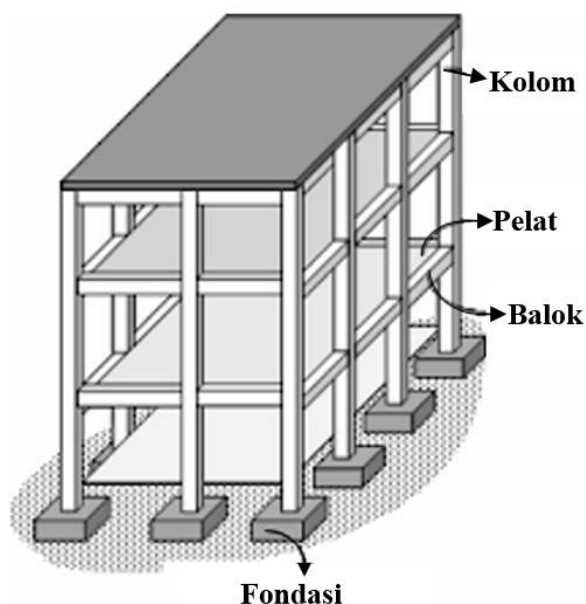
terjadi eksentrisitas. Semakin dekat jarak antara keduanya, maka akan semakin kecil efek torsi yang akan terjadi.

2.4 Sistem Struktur Tahan Gempa

Sebuah struktur gedung diharuskan memiliki elemen yang mampu menahan beban yang diberikan, baik itu beban gravitasi (beban hidup dan beban mati), beban dinamik (beban gempa dan angin), maupun kombinasi dari keduanya. Untuk memikul beban tersebut, maka digunakan beberapa sistem struktur tahan gempa, misalnya *frame system*, *wall system*, dan *dual system*. Desain Struktur bangunan tahan gempa dimulai dengan perhitungan dimensi elemen struktur (Balok, Pelat dan Kolom), pembebanan, analisa struktur, desain penulangan balok, pelat dan kolom, pengecekan kekuatan elemen balok, pelat dan kolom (Ardianto, 2021).

2.4.1 Sistem Struktur Rangka (*Frame System*)

Sistem Struktur Rangka atau disebut juga Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) merupakan rangka yang elemen strukturnya (meliputi pelat, balok, kolom, dan *joint*) mampu menahan gaya yang bekerja melalui aksi lentur, geser, dan gaya aksial (Badan Standardisasi Nasional, 2019b). Sistem Struktur Rangka biasanya digunakan pada struktur gedung yang memiliki jumlah lantai/tingkat rendah dan menengah.



Gambar 2.1 Ilustrasi Sistem Struktur Rangka

Jenis-jenis SRPM yaitu sebagai berikut:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa atau juga dikenal sebagai SRPMB, memiliki kekuatan yang besar dan deformasi inelastik. Dimungkinkan untuk mengabaikan persyaratan "*Strong Column Weak Beam*" yang diperlukan untuk mendesain struktur yang mengandalkan daktilitas yang tinggi saat mendesain SRPMB. Untuk daerah gempa yang kecil, sistem ini berfungsi tetapi jarang digunakan untuk daerah gempa yang besar. Metode SRPMB digunakan untuk menghitung struktur gedung di zona 1 dan 2, yang merupakan zona wilayah dengan tingkat kegempaan rendah. Pada Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa balok harus mempunyai paling sedikit dua batang tulangan longitudinal yang menerus sepanjang kedua muka atas maupun bawah. Tulangan ini harus disalurkan pada muka tumpuan. Dalam SRPMB Faktor Reduksi Gempa (R) ialah 3,5. Sistem ini merupakan sistem dengan rangka balok kolom atau rangka pelat kolom yang dicor di tempat atau pracetak. Sistem ini harus memenuhi syarat sesuai SNI 2847-2019, Pasal 18.3, namun pasal ini berlaku untuk SRPMB yang dikenakan KDS B.

2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Berdasarkan SNI 2847-2019, Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) adalah sistem rangka ruang dimana komponen struktur dan joinnya memiliki kemampuan untuk menahan gaya yang bekerja melalui aksi lentur, geser, dan aksial. SRPMM juga memiliki ketentuan untuk pemasangan tulangan geser dan perhitungan beban geser. Syarat yang dikenakan pada sistem ini yaitu sesuai SNI 2847-2019, Pasal 18.4, namun hanya berlaku apabila SRPMM yang dikenakan KDS C.

3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus, juga dikenal sebagai SRPMK, adalah bagian struktur yang dirancang untuk memikul lentur dan memiliki kemampuan untuk memikul gaya yang disebabkan oleh gempa. SRPMK memiliki perilaku struktur daktilitas tinggi. Perilaku daktilitas tinggi SRPMK memberikan keuntungan khusus, yaitu tingkat ketahanan gempa yang sangat tinggi. SRPMK memiliki aturan yang cukup rinci untuk dipenuhi sehubungan dengan tulangan.

Hal ini disebabkan oleh kemampuan untuk mencapai tingkat daktilitas yang tinggi. Jenis sistem rangka pemikul momen beton bertulang dengan faktor reduksi sebesar 9. Sistem ini harus memenuhi persyaratan pada SNI 2847-2019, Pasal 18.2.3 – 18.2.8 dan Pasal 18.6 – 18.8. Untuk rangka balok kolom pracetak harus memenuhi Pasal 18.2.3 – 18.9. Pasal ini berlaku hanya untuk SRPMK yang dikenakan KDS D, E, atau F.

2.4.2 Sistem Struktur Dinding (*Wall System*)

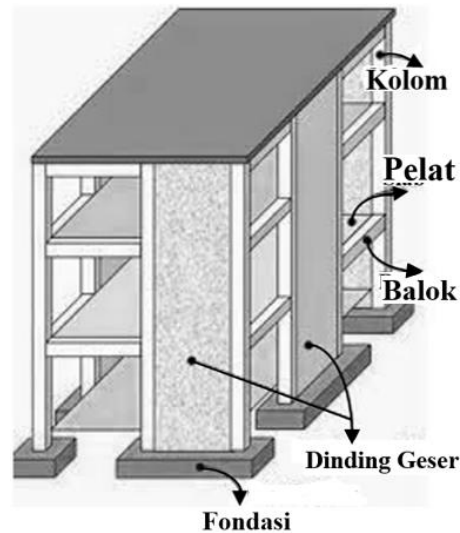
Pada sistem ini menggunakan elemen dinding sebagai struktur utama untuk menahan beban yang bekerja (gravitasi dan dinamik) pada struktur. Dinding yang digunakan pada struktur ini merupakan dinding beton bertulang (*shear wall*) maupun pasangan batu yang terhubung langsung dengan elemen balok dan kolom pada struktur. Sistem struktur yang menggunakan kombinasi dinding geser beton biasa dan sistem rangka beton pemikul momen biasa untuk menahan beban-beban lateral sesuai perbandingan kekakuan yang dimilikinya, dengan memperhatikan interaksi antara dinding geser dan rangka di semua tingkat atau lantai bangunan (Badan Standardisasi Nasional, 2019a). Desain yang dilakukan hanya berfokus pada beban gravitasi, sementara untuk pengaruh gempa diabaikan. Penggunaan sistem ini efektif untuk struktur gedung dengan tingkat rendah dan menengah.

Sistem struktur dinding terbagi menjadi 2 jenis, yaitu Sistem Dinding Struktural Khusus (SDSK) dan Sistem Dinding Struktural Umum (SDSU). Berdasarkan SNI 2847-2019, untuk SDSK harus memenuhi Pasal 18.10 yang digunakan pada struktur yang dikenakan KDS D, E, atau F. Sedangkan SDSU berlaku hal yang sama untuk struktur dengan KDS A, B, atau C.

2.4.3 Sistem Struktur Ganda (*Dual System*)

Sistem struktur ganda menggabungkan sistem rangka (*frame*) dan sistem dinding (*wall*) untuk menahan beban yang bekerja. Dalam memikul beban, ada persyaratan pembagian peran antara *frame* dan *wall* pada struktur ganda ini. Struktur rangka harus mampu sedikitnya 25% dan struktur dinding sedikitnya 75% dalam menahan beban gempa. Struktur ini umum digunakan pada gedung tingkat menengah dan tingkat tinggi. sistem struktur dengan rangka ruang lengkap untuk

memikul beban gravitasi, sedangkan tahanan terhadap gempa disediakan oleh kombinasi sistem rangka pemikul momen dan dinding geser atau oleh kombinasi sistem rangka pemikul momen dan rangka *bressing* (Badan Standardisasi Nasional, 2019a).



Gambar 2.2 Ilustrasi Sistem Struktur Ganda

2.5 Perencanaan Pembebanan

2.5.1 *Dead Load (DL)*

Beban mati adalah beban gravitasi yang berasal dari berat semua komponen gedung/bangunan yang bersifat permanen selama masa layan struktur termasuk pula unsur-unsur tambahan, mesin serta peralatan tetap yang tak terpisahkan dari gedung tersebut (Novita Sari et al., 2023).

Dead Load atau Beban Mati adalah berat dari semua elemen gedung yang bersifat tetap. Beban Mati dapat dimodelkan secara fisik pada *software* ETABS seperti balok, kolom, maupun pelat.

2.5.2 *Superimposed Dead Load (SDL)*

Superimposed Dead Load atau Beban Mati Tambahan adalah beban yang diletakkan pada struktur dan tidak dimodelkan secara fisik pada *software* meliputi berat dinding, keramik, spesi, *plafond* dan penggantung, instalasi listrik, pipa air bersih serta kotor, dan lain sebagainya. Menurut (Departemen Pekerjaan Umum,

1987), beban mati pada struktur dibagi menjadi 2 yaitu beban mati akibat material konstruksi dan beban mati akibat komponen gedung.

Perhitungan besarnya beban mati suatu elemen dilakukan dengan meninjau berat satuan material tersebut berdasarkan volume elemen dengan mengikuti peraturan yang berlaku di Indonesia, salah satunya yaitu pada SNI 1727-2020 “Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain”.

2.5.3 *Live Load* (LL)

Live Load atau Beban Hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung dan di dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa umur layan gedung tersebut, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai maupun atap.

Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung dan di dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah sehingga dapat mengakibatkan perubahan lantai atau atap (Usmat I et al., 2019).

Jenis beban ini tergantung sari fungsi gedung yang ditinjau dan telah diatur dalam (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Beban hidup yang dimaksud disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum, L_0 dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)				

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
Sistem lantai akses				
- Ruang kantor	2,4	Ya	Ya	8,9
- Ruang komputer	4,79	Ya	Ya	8,9
Gudang persenjataan dan ruang latihan	7,18	Tidak	Tidak	
Ruang pertemuan				
- Kursi tetap (terikat di lantai)	2,87	Tidak	Tidak	
- Lobi	4,79	Tidak	Tidak	
- Kursi dapat dipindahkan	4,79	Tidak	Tidak	
- Panggung pertemuan	4,79	Tidak	Tidak	
- Lantai podium	7,18	Tidak	Tidak	
- Tribun penonton dan arena dengan kursi tetap (terikat di lantai)	4,79	Tidak	Tidak	
- Ruang pertemuan lainnya	4,79	Tidak	Tidak	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 4,79 kN/m ²	Ya	Ya	
Jalur untuk akses pemeliharaan	1,92	Ya	Ya	1,33
Koridor				
- Lantai pertama	4,79	Ya	Ya	

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Lantai lain	Sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain			
Ruang makan dan restoran	4,79	Tidak	Tidak	
Hunian (lihat rumah tinggal)				
Dudukan mesin elevator (pada area 50 mm x 50 mm)		-	-	1,33
Konstruksi pelat lantai finishing ringan (pada area 25 mm x 25 mm)		-	-	0,89
Jalur penyelamatan saat kebakaran	4,79	Ya	Ya	
- Hunian satu keluarga saja	1,92	Ya	Ya	
Tangga permanen		-	-	Lihat pasal 4.5.4
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10)				
- Mobil penumpang saja	1,92	Tidak	Ya	Lihat Pasal 4.10.1
- Truk dan Bus	Lihat Pasal 4.10.2	-	-	Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman	Lihat 4.5.1	-	-	Lihat 4.5.1

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Batang pegangan				Lihat 4.5.2
Helipad (Lihat Pasal 4.11)				
- Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 13,35 kN atau kurang	1,92	Tidak	-	Lihat Pasal 4.11.2
- Helikopter dengan berat landas lebih dari 13,35 kN	2,87	Tidak	-	Lihat Pasal 4.11.2
Rumah sakit				
- Ruang operasi, laboratorium	2,87	Ya	Ya	4,45
- Ruang pasien	1,92	Ya	Ya	4,45
- Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Hotel (lihat rumah tinggal)				
Perpustakaan				
- Ruang baca	2,87	Ya	Ya	4,45
- Ruang penyimpanan	7,18	Tidak	Ya	4,45
- Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Pabrik				
- Ringan	6,00	Tidak	Ya	8,90
- Berat	11,97	Tidak	Ya	13035
Gedung perkantoran				
- Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Lobi dan koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	8,90
- Kantor	2,40	Ya	Ya	8,90
- Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	8,90
Lembaga hukum				
- Blok sel	1,92	Ya	Ya	
- Koridor	4,79	Ya	Ya	
Tempat rekreasi				
- Tempat <i>bowling</i> , <i>billiard</i> , dan penggunaan sejenis	3,59	Tidak	Tidak	
- Ruang dansa dan <i>ballroom</i>	4,79	Tidak	Tidak	
- Gimnasium	4,79	Tidak	Tidak	
Rumah tinggal				
- Hunian satu dan dua keluarga				
a) Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang	0,48	Ya	Ya	
b) Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang	0,96	Ya	Ya	
c) Semua ruang kecuali tangga	1,44	Ya	Ya	
- Semua hunian rumah tinggal lainnya				
a) Ruang pribadi dan koridornya	1,92	Ya	Ya	
b) Ruang publik	4,79	Ya	Ya	
c) Koridor ruang publik	4,79	Tidak	Tidak	
Atap				

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Atap datar, berhubung, dan lengkung	0,96	Ya	-	0,89
- Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya	-	
- Atap untuk tempat berkumpul	4,70	Ya	-	
- Atap vegetatif dan atap lanskap				
a) Atap bukan untuk penghuni	0,96	Ya	-	
b) Atap untuk tempat berkumpul	4,79	Ya	-	
c) Atap untuk penghuni lainnya	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya	-	
- <i>Awning</i> dan kanopi				0,89
a) Atap konstruksi pabrik yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	0,24	Tidak	-	

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Rangka penumpu layer penutup	0,24 Berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka	Tidak	-	
- Semua konstruksi lainnya	0,96	Ya		
- Komponen struktur atap yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja				8,90
a) Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap di atas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjaanya, dan garasi bengkel		-	-	1,33
b) Semua komponen struktur atap utama lainnya		-	-	1,33

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
- Semua permukaan atap dengan beban pekerjaan pemeliharaan				
Sekolah				
- Ruang kelas	1,92	Ya	Ya	4,45
- Koridor di atas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
- Koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45
Scuttless, rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses				0,89
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	11,97	Tidak	Ya	35,60
Tangga dan jalan keluar	4,79	Ya	Ya	1,33
- Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga	1,92	Ya	Ya	1,33
Gudang di atas langit-langit	0,96	Ya	Ya	
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan)				
- Ringan	6,00	Tidak	Ya	
- Berat	11,97	Tidak	Ya	
Toko				
- Eceran				
a) Lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45

Hunian atau Penggunaan	Merata, L_0 (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan	Terpusat (kN)
b) Lantai di atasnya	3,59	Ya	Ya	4,45
- Grosir, di semua lantai	6,00	Tidak	Ya	4,45
Penghalang kendaraan				Lihat Pasal 4.5.3
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	2,87	Ya	Ya	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	4,79	Tidak	Tidak	

2.5.4 Wind Load (WL)

Wind Load atau Beban Angin adalah semua beban yang bekerja pada gedung ataupun bagian gedung yang terjadi karena adanya tekanan udara yang mengalami gesekan dengan permukaan struktur. Beban Angin ditentukan dengan mengasumsikan adanya tekanan positif dan tekanan negatif (isapan) yang bekerja tegak lurus pada bidang yang ditinjau. Namun, beban angin tidak memberi kontribusi yang besar terhadap struktur dibandingkan beban lainnya.

Beban angin pada struktur terjadi karena adanya gesekan udara dengan permukaan struktur dan perbedaan tekanan dibagian depan dan belakang struktur (Faoji et al., 2019). Analisis beban angin menggunakan sistem penahan gaya angin utama prosedur terarah. Beban angin desain minimum untuk bangunan gedung tertutup tidak boleh lebih kecil dari 0,77 kN/m² dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung dan 0,38 kN/m² dikalikan dengan luas atap bangunan gedung yang diproyeksikan pada bidang vertikal tegak lurus terhadap arah angin yang di asumsikan.

Untuk menghitung pengaruh angin terhadap suatu struktur mengacu pada SNI 1727-2020 dengan menggunakan parameter sebagai berikut:

2.5.4.1 Kecepatan Angin Dasar (V)

Kecepatan angin dasar (V) yang digunakan dalam menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain ditentukan dari kondisi batas sesuai LRFD.

2.5.4.2 Faktor Arah Angin (K_d)

Faktor arah angin dalam menentukan beban angin didasarkan pada analisis rasional dari kecepatan angin. Faktor arah angin (K_d) ditentukan dari Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Faktor Arah Angin

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	
- Persegi	0,90
- Segi enam	0,95
- Segi delapan	1,0 ^a
- Bundar	1,0 ^a
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

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

2.5.4.3 Kategori Eksposur

Untuk setiap arah angin yang diperhitungkan, eksposur arah melawan angin didasarkan pada kekasaran permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun sebelumnya. Berikut kategori kekasaran permukaan:

1. Kekasaran permukaan B

Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah hutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga-tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.

2. Kekasaran permukaan C

Dataran terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 30 ft (9,1 m). Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.

3. Kekasaran permukaan D

Permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air. Kategori ini termasuk hamparan lumpur halus.

Berikut merupakan kategori eksposur:

1. Eksposur B: Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m). Berlaku apabila kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan B. Berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1500 ft (457 m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1 m). Eksposur B berlaku jika kekasaran permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2600 ft (792 m) atau 20 kali bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.
2. Eksposur C: Berlaku untuk semua kasus dimana eksposur B atau Eksposur D tidak berlaku.
3. Eksposur D: Berlaku jika kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh kekasaran permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5000 ft (1524 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku jika kekasaran

permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar.

2.5.4.4 Faktor Topografi (K_{zt})

Faktor peningkatan kecepatan angin pada daerah perkotaan secara umum tidak menimbulkan perubahan mendadak pada topografi, maka nilai $K_{zt} = 1,0$.

2.5.4.5 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Faktor elevasi permukaan tanah untuk menyesuaikan densitas udara (K_e) harus ditentukan sesuai dengan tabel Tabel 2.3. Untuk semua elevasi, boleh diambil nilai yang ke – 1.

Tabel 2.3 Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Elevasi tanah di atas permukaan laut (m)	Faktor elevasi permukaan tanah (K_e)
<0	Lihat catatan
0	1,00
305	0,96
610	0,93
914	0,90
1219	0,86
1524	0,83
1829	0,80
>1829	Lihat catatan

Catatan:

- Perkiraan konservatif, boleh diambil $K_e = 1,00$ dalam semua kasus
- Faktor K_e harus ditentukan dari tabel di atas dengan menggunakan interpolasi atau dari rumus berikut untuk semua elevasi:

$$K_e = e^{-0,00119z_g} \quad (Z_g = \text{elevasi tanah di atas permukaan laut, dalam m})$$

- Dalam semua kasus K_e boleh diambil sebesar 1,00

2.5.4.6 Faktor Efek Hembusan Angin (G)

Faktor efek hembusan angin yang digunakan untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil sebesar 0,85.

2.5.4.7 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan

Berdasarkan kategori eksposur yang tekanan kecepatan (K_z atau K_h) ditentukan dari dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Untuk } 4,6 \text{ m} \leq z \leq Z_g : K_z = 2,01 \left(\frac{z}{Z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.1)$$

$$\text{Untuk } z < 4,6 \text{ m } Z_g : K_z = 2,01 \left(\frac{15}{Z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.2)$$

Berikut merupakan nilai α dan Z_g yang disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai α dan Z_g

Eksposur	α	Z_g (m)
B	7,0	365,76
C	9,5	274,32
D	11,5	213,36

2.5.4.8 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) dapat ditentukan berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan bangunan gedung ditentukan dari Pasal 26.12. Berikut merupakan klasifikasi ketertutupan bangunan gedung yang disajikan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Klasifikasi Ketertutupan Bangunan Gedung

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Tertutup	A_0 kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{0i}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18 -0,18
Tertutup sebagian	$A_0 > 1,1 A_{0i}$ dan $A_0 >$ terkecil dari $0,01 A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{0i}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55 -0,55
Terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18 -0,18
Terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

Untuk bangunan tertutup sebagian yang memiliki sebuah ruangan besar tanpa sekat, koefisien tekanan internal, (GC_{pi}) harus dikalikan dengan faktor reduksi, R_i berikut ini:

$$R_i = 0,5 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_i}{22,800 A_{og}}}} \right) < 1,0 \quad (2.3)$$

Dimana:

A_{og} = Luas total bukan pada amplop bangunan Gedung (dinding dan atap, dalam ft^2)

V_i = Volume internal ruang tanpa partisi, dalam ft^3

2.5.4.9 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal dibagi menjadi koefisien untuk dinding dan atap, nilai C_p ditentukan berdasarkan Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

Tabel 2.6 Koefisien Tekanan Eksternal Dinding (C_p)

Koefisien Tekanan Dinding (C_p)			
Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
Angin pergi	0-1	-0,5	q_h
	2	-0,3	q_h
	>4	-0,2	q_h
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7	q_h

Tabel 2.7 Koefisien Tekanan Eksternal Atap (C_p)

Arah Angin	h/L	Di sisi angin datang			Di sisi angin pergi		
		Sudut, θ (derajat)			Sudut, θ (derajat)		
		10	15	20	10	15	≥ 20
Tegak lurus terhadap bubungan untuk $\theta \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,7	-0,5	-0,3	-0,3	-0,5	-0,6
		-0,18	0,0 ^a	0,2			
		-0,9	-0,7	-0,4			
	0,5	-0,18	-0,18	0,0 ^a	-0,5	-0,5	-0,6
		-1,3 ^b	-0,1	-0,7			
	≥ 1	-0,18	-0,18	-0,18	-0,7	-0,6	-0,6

Perhitungan tekanan angin desain untuk SPGAU bangunan gedung pada semua ketinggian dalam lb/ft^2 (N/m^2) harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$p = qGC_p - q_1(GC_{pi}) \quad (2.4)$$

Tekanan kecepatan velositas sebagai berikut:

$$q_z = 0,613K_zK_{zt}K_dK_eV^2(\text{N/m}^2), V \text{ dalam m/s} \quad (2.5)$$

Dimana:

$q = q_z$ untuk dinding sisi angin datang dan q_h untuk dinding sisi angin perseg

G = Faktor efek hembusan angin

C_p = Koefisien tekanan eksternal

2.5.5 Earthquake Load (EL)

Earthquake Load atau Beban Gempa untuk desain bangunan gedung menggubakan respon spektrum telah disajikan pada *website* resmi PU sesuai dengan peraturan Gempa (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Besarnya simpangan horizontal bergantung pada kemampuan struktur untuk menahan gaya gempa yang terjadi. Apabila struktur memiliki kekakuan yang besar untuk merespon gaya gempa, maka struktur akan mengalami simpangan horizontal yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang tidak memiliki kekakuan yang cukup besar.

Menurut (Faoji et al., 2019), beban gempa merupakan salah satu beban yang harus diperhitungkan pada saat merancang suatu bangunan di daerah rawan gempa. Berbeda dengan jenis beban lainnya yang besarnya tidak dipengaruhi oleh struktur bangunan yang terkena gempa, besarnya beban gempa sangat dipengaruhi oleh kondisi struktur bangunan tersebut. Hal ini terjadi karena pembebanan seismik bekerja melalui lapisan tanah yang bergerak secara siklis dalam arah horizontal dan vertikal.

Probabilitas terjadinya gempa yaitu 2% dalam jangka waktu 50 tahun atau gempa dengan periode ulang 2500 tahun yang merupakan gempa *Max Considered*

Earthquake Targeted Risk (MCER). Respon Gempa elastis ini memiliki redaman sebesar 5% (Badan Standardisasi Nasional, 2019a).

Cara untuk mendapatkan nilai dari gaya geser yang bekerja dikarenakan beban gempa, dibutuhkan beberapa syarat dan juga parameter yang harus dipenuhi dan dihitung secara sistematis dan matematis, parameter dan persyaratan yang akan digunakan dalam perancangan pembebanan gempa pada struktur gedung ini adalah SNI 1726 – 2019.

2.5.5.1 Kategori Risiko Bangunan

Untuk menentukan kategori risiko disesuaikan dengan jenis pemanfaatan atau kegunaan dari bangunan yang akan direncanakan sesuai dengan SNI 1726-2019, Pasal 4.1.2. Berikut merupakan kategori risiko bangunan disajikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

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

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
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 Gedung dan non-gedung, tidak termasuk ke dalam 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 di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	III
Gedung dan non-gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki 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.	IV

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
- 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 non-gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	

2.5.5.2 Faktor Keutamaan Gempa

Untuk berbagai kategori gedung bergantung pada probabilitas terjadinya keruntuhan struktur gedung selama masa umur layan gedung yang diharapkan. Berdasarkan SNI 1726-2019, Pasal 4.1.2, semua kategori risiko bangunan gedung dan non gedung, pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa (I_e). Berikut merupakan faktor keutamaan gempa yang disajikan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Faktor Keutamaan Gempa

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

2.5.5.3 Klasifikasi Situs

Profil tanah harus diklasifikasikan terlebih dahulu, dengan profil tanah 30 m lapisan paling atas. Apabila tidak tersedia data tanah yang spesifik pada situs hingga 30 m, maka sifat-sifat tanah harus diestimasi oleh ahli geoteknik yang tersertifikasi keahliannya dengan memberikan laporan penyelidikan tanah berdasarkan kondisi geotekniknya (SNI 1726-2019, Pasal 5). Selanjutnya, apabila sifat tanah tidak memadai untuk penentuan kelas situs, maka kelas situs SE (tanah

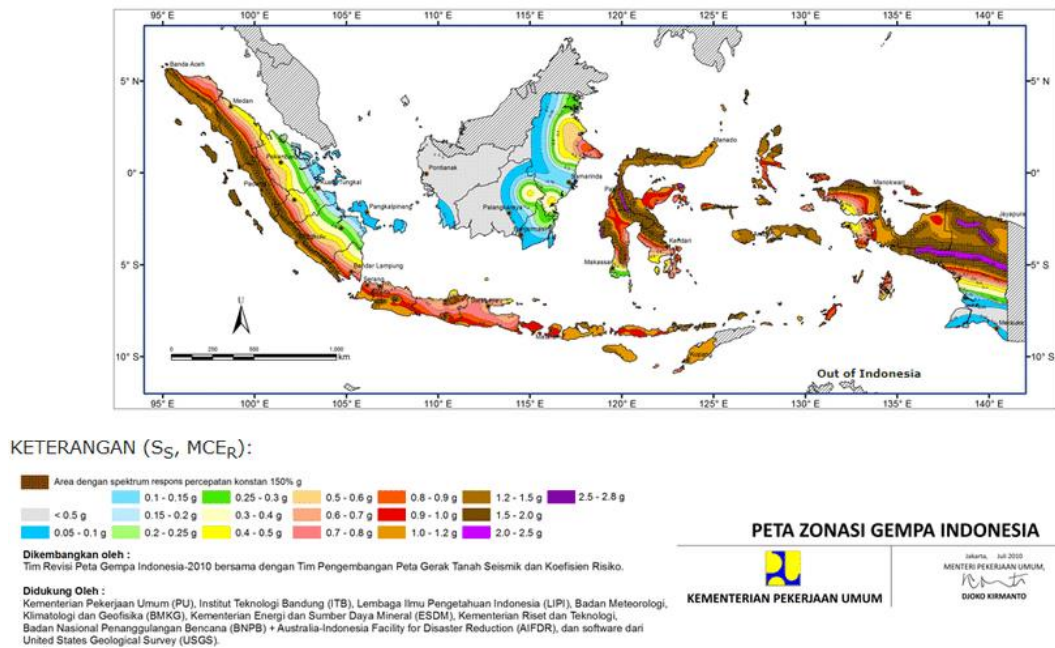
lunak) harus digunakan sesuai dengan syarat yang tertera pada SNI 1726-2019, Pasal 6.2. Berikut merupakan klasifikasi situs yang disajikan pada Tabel 2.10

Tabel 2.10 Klasifikasi Situs

Kelas situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 - 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, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir, $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa.		

2.5.5.4 Wilayah Gempa Indonesia

Salah satu faktor yang mempengaruhi besaran beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan adalah faktor wilayah gempa. Dengan demikian, besar kecilnya beban gempa tergantung juga pada lokasi dimana struktur akan didirikan. Parameter percepatan gempa batuan dasar terdiri dari percepatan batuan dasar pada periode 0,2 detik (S_s) dan percepatan batuan dasar pada periode 1,0 detik (S_1) yang harus ditetapkan masing-masing dari respon spektrum percepatan 0,2 dan 1,0 detik dalam peta gempa untuk periode ulang 2500 tahun. Berikut merupakan Peta Wilayah Gempa Indonesia yang disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Peta Zona Gempa Indonesia

2.5.5.5 Faktor Koefisien Situs

Penentuan *respons spectral* percepatan gempa MCE_R pada permukaan tanah diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan 1,0 detik (SNI 1726-2019, Pasal 6.2). Faktor ini meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1,0 detik (F_v). Parameter *respons spectral* percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1,0 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$S_{SM} = F_a \times S_S \quad (2.6)$$

$$S_{S1} = F_v \times S_1 \quad (2.7)$$

Tabel 2.11 Koefisien Situs 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

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
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)					

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

Tabel 2.12 Koefisien Situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	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)					

(a) SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

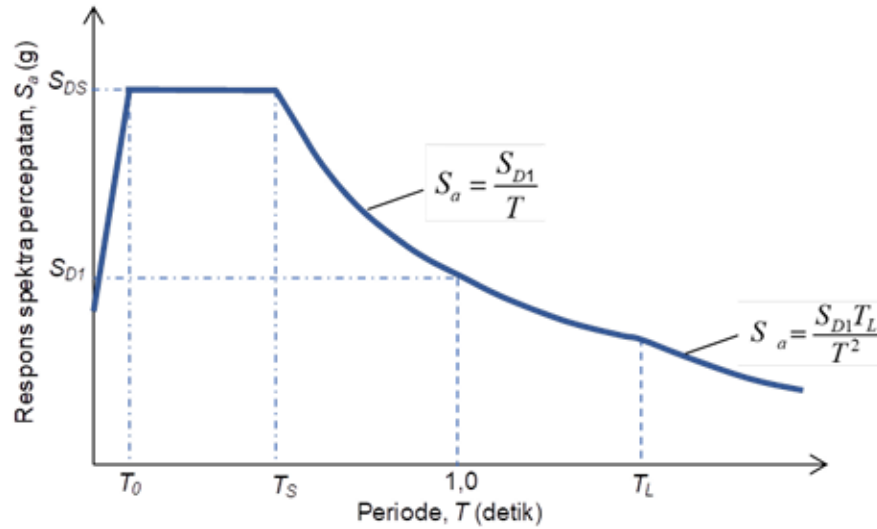
2.5.5.6 Respon Spektra Desain

Respon spektra atau respon spektrum merupakan nilai yang menggambarkan respon maksimum dari sistem berderajat kebebasan tunggal (SDOF) pada berbagai frekuensi alami (periode alami) teredam akibat suatu goyangan tanah (SNI 1726-2019, Pasal 6.3 – 6.4). Untuk membuat kurva respon spektra desain, terlebih dahulu harus menentukan parameter percepatan spektra desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) menggunakan persamaan berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad (2.8)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \quad (2.9)$$

Apabila respon spektra desain diperlukan oleh metode ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik situs tidak digunakan, maka kurva respon spektra desain harus dikembangkan dengan mengikuti beberapa persyaratan dan ditunjukkan pada Gambar 2.4 sebagai berikut.



Gambar 2.4 Respon Spektrum Desain

1. Setiap periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respon percepatan desain (S_a) harus diambil dengan menggunakan persamaan berikut.

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.10)$$

2. Setiap periode yang lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S , spektrum respon percepatan desain (S_a) sama dengan S_{DS} .
3. Untuk periode yang lebih besar dari T_S tetapi lebih kecil atau sama dengan T_L , respon spektra percepatan desain (S_a) diambil dari:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.11)$$

4. Untuk periode yang lebih besar dari T_L , respon spektra percepatan desain (S_a) diambil dari:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.12)$$

Dimana:

S_{DS} = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode pendek

S_{D1} = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode 1 detik

T = Periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.13)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.14)$$

T_L = Periode panjang

2.5.5.7 Kategori Desain Seismik

Pengklasifikasian ini diberlakukan pada struktur berdasarkan kategori risiko bangunan dan tingkat kekuatan gerakan tanah akibat gempa yang diantisipasi di lokasi struktur bangunan. Berdasarkan SNI 1726-2019, Pasal 6.5, kategori desain seismik ditentukan dari kategori risiko bangunan dan tingkat gerakan tanah akibat gempa pada lokasi situs.

Tabel 2.13 Kategori Risiko Berdasarkan Nilai S_{DS}

Nilai SDS	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,5$	C	D
$S_{DS} \geq 0,50$	D	D

Tabel 2.14 Kategori Risiko Berdasarkan Nilai S_{D1}

Nilai SDS	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
$S_{D1} \geq 0,20$	D	D

Catatan:

Lokasi dengan nilai $S_1 \geq 0,75$ g, maka $K_{DS} = E$, untuk kategori risiko I, II, III, dan $K_{DS} = F$, untuk kategori risiko IV

2.5.5.8 Parameter Penahan Gaya Seismik

Struktur penahan beban gempa tentang setiap tipe dibagi berdasarkan tipe elemen vertikal yang digunakan untuk menahan gaya seismik lateral. Setiap sistem

penahan gaya seismik yang dipilih harus dirancang dan didetailkan sesuai dengan persyaratan khusus bagi sistem tersebut yang telah ditetapkan.

Beberapa syarat pendetailan yang harus dipenuhi oleh elemen-elemen pemikul gaya seismik disajikan pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	$5\frac{1}{2}$	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	$5\frac{1}{2}$	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	$4\frac{1}{2}$	3	4	TB	TB	10	TI	TI
4. Rangka baja pemikul momen biasa	$3\frac{1}{2}$	3	3	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	$5\frac{1}{2}$	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	$4\frac{1}{2}$	TB	TB	TI	TI	TI

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	$2\frac{1}{2}$	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	$5\frac{1}{2}$	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	$4\frac{1}{2}$	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	$5\frac{1}{2}$	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	$2\frac{1}{2}$	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul	$3\frac{1}{2}$	3°	$3\frac{1}{2}$	10	10	10	10	10

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m)				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
momen khusus dengan pembautan								

Keterangan:

TB = Tidak dibatasi

TI = Tidak diizinkan

2.5.5.9 Perhitungan Gaya Lateral Ekuivalen

1. Gaya Geser Dasar Seismik (V)

Gaya geser dasar (*base shear*) merupakan jumlah gaya-gaya horizontal yang bekerja pada dasar bangunan karena pengaruh gempa (Erwinsyah et al., 2013). Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_S \times W \quad (2.15)$$

Dimana:

C_S = Koefisien respon seismik

W = Berat seismik efektif

2. Koefisien Respon Seismik (C_S)

Nilai koefisien respon seismik harus ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$C_S = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.16)$$

Dimana:

S_{DS} = Parameter percepatan spectral desain untuk periode pendek

R = Koefisien modifikasi respon pada Tabel 2.15

I_e = Faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan Tabel 2.9

Nilai C_s yang dihitung tidak perlu melebihi nilai C_s maksimum pada persamaan berikut.

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.17)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.18)$$

Nilai C_s yang dihitung pada persamaan tidak boleh kurang dari C_s minimum, sebagai berikut.

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.19)$$

Dimana:

S_{D1} = Parameter percepatan spectral desain untuk periode 1,0 detik

S_1 = Parameter percepatan respon spectral maksimum

T = Periode fundamental struktur (detik)

R = Koefisien modifikasi respon pada Tabel 2.18

I_e = Faktor keutamaan gempa sesuai Tabel 2.9

3. Berat Seismik Efektif (W)

Berdasarkan SNI 1726-2019, Pasal 7.7.2, berat efektif struktur harus menyertakan seluruh beban mati dan minimum 25% beban hidup lantai.

4. Periode Fundamental (T)

Periode fundamental struktur (T) tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) pada Tabel 2.17 dan periode fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan pada persamaan di bawah. Apabila nilai T tidak tersedia dalam melakukan analisis, maka diizinkan langsung menggunakan periode bangunan pendekatan (T_a).

a. Periode Fundamental Pendekatan (T_a)

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.20)$$

Dimana:

h_n = ketinggian struktur (m)

C_t dan x = koefisien, sesuai Tabel 2.17

Tabel 2.16 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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 <i>bresing</i> eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan <i>bresing</i> terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Untuk struktur *shear wall* batu bata atau beton dengan tinggi tidak melebihi 36,6 m, perhitungan periode fundamental pendekatan (T_a) diizinkan menggunakan persamaan berikut.

$$T_a = \frac{0,00058}{\sqrt{C_w}} h_n \quad (2.21)$$

$$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^x \left[\frac{A_i}{1+0,83 \left(\frac{h_n}{D_i} \right)} \right] \quad (2.22)$$

Dimana:

h_n = Ketinggian struktur (m)

A_B = Luas dasar struktur (m^2)

A_i = Luas badan dinding geser ke-i (m^2)

D_i = Panjang *shear wall* ke-i

x = Jumlah *shear wall* dalam bangunan yang efektif memikul gaya lateral dalam arah yang ditinjau

b. Batas Atas Periode Fundamental ($C_u.T_a$)

Tabel 2.17 Koefisien Batas Atas pada Periode yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

c. Pemilihan Periode Fundamental yang Menentukan

Periode fundamental struktur tidak boleh melebihi ($T = C_u.T_a$) dan tidak boleh kurang dari periode fundamental pendekatan ($T_a = C_t(h_n)^x$) (SNI 1726-2019, Pasal 7.8.2). Apabila periode fundamental hasil analisis struktur menggunakan komputer (T_c) lebih besar dari ($T = C_u.T_a$) pada suatu arah tertentu, maka periode struktur (T) harus diambil sebesar ($T = C_u.T_a$) (SNI 1726-2019, Pasal 7.9.1.4).

5. Distribusi Beban Gempa Tiap Lantai

Gaya seismik lateral, F_x (kN) pada semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut.

$$F_x = C_{vx} \cdot V \quad (2.23)$$

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \quad (2.24)$$

Dimana:

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)

W_i, W_x = Berat seismik total struktur yang dikenakan pada tingkat i atau x

h_i, h_x = Tinggi dasar sampai tingkat i atau x

k = Eksponen yang terkait dengan perioda struktur

6. *Base Shear* Tiap Lantai

Geser tingkat desain seismik di semua tingkat, V_x (kN) harus ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$V_x = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.25)$$

Dimana:

F_i = Bagian dari geser dasar seismik (V) pada tingkat ke- i (kN)

Geser tingkat desain seismik, V_x (kN) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem pemikul gaya seismik di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen pemikul vertikal dan diafragma.

7. Batas Simpangan antar Lantai

Simpangan pusat massa tingkat- x (δ) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_e}{I_e} \quad (2.26)$$

Dimana:

C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral

δ_e = Simpangan di tingkat-x yang disyaratkan pada pasal ini, yang ditentukan dengan analisis elastik

I_e = Faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 0

Tabel 2.18 Simpangan Antar Tingkat Izin

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

$$\delta_{ijin} = 0,02 \times h$$

2.5.6 Analisis Riwayat Waktu (*Time History*)

Getaran gempa yang memiliki intensitas tertentu dapat menyebabkan kerusakan ataupun keruntuhan pada struktur. Gaya gempa dinamik yang intensitasnya berubah-ubah berdasarkan waktu akan memiliki pengaruh terhadap struktur yang berubah-ubah pula menurut waktu. Metode *Linear Time History Analysis* (LTHA) merupakan metode analisis beban gempa dengan menggunakan rekaman gempa asli (*ground motion*) yang diperoleh secara langsung dari alat perekam gempa (*Seismograph*) (Lesmana Y, 2020). Prosedur yang paling penting dalam penggunaan metode ini yaitu proses penyetaraan intensitas gempa yang dikenal dengan *spectra matching method*. Metode ini mengacu pada SNI 1726-2019, Pasal 7.9.2.

Pada analisis *Time History*, untuk memperoleh respon struktur akibat pembebanan gempa didapatkan dari rekam *accelerograms* (percepatan gempa masukan). *Accelerograms* merupakan perekaman akselerasi gerakan dasar bumi pada saat terjadinya gempa. Rekam *accelerograms* yang dipilih pada analisis ini harus mengambil dari rekaman gerakan tanah akibat gempa yang diperoleh di suatu lokasi dengan keadaan geologi, topografi, serta seismotektoniknya hampir menyamai dengan lokasi yang akan ditinjau. Analisis dinamik *time history* dapat merepresentasikan sifat dinamik percepatan gempa dan respon struktur, sehingga metode analisis ini dapat memberikan gambaran dan informasi respon struktur yang lebih lengkap (Anggen et al., 2014).

Analisis *Time History* pada umumnya lebih sering digunakan untuk keadaan linear, namun tidak juga digunakan untuk keadaan linear saja. Berdasarkan SNI 1726-2019, Pasal 7.9.2.1, analisis *linear time history* harus terdiri dari analisis model matematis linear dari struktur untuk memastikan responnya melalui metode-metode integrasi numerik terhadap rangkaian riwayat percepatan yang dicocokkan secara *spectral* yang kompatibel dengan rangkaian respon spektra desain di lokasi tersebut.

Pada SNI 1726-2019, Pasal 7.9.2.3, analisis *linear time history*, diperlukan minimal 3 (tiga) rekaman atau simulasi riwayat waktu percepatan gerak tanah horizontal yang dipilih dari beberapa kejadian gempa dengan magnitudo serta jarak sumber gempa (sesar/patahan/subduksi) yang secara konsisten mengontrol gerak tanah gempa MCE_R .

2.5.7 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban untuk struktur, komponen-komponen struktur dan elemen-elemen fondasi harus dirancang sedemikian sehingga hasil dari kombinasi pembebanan ini akan menghasilkan efek beban terfaktor dan desain dari keseluruhan gedung harus memiliki kekuatan desain yang sama atau lebih besar dari efek yang ditimbulkan pada kombinasi pembebanan.

Terdapat dua metode kombinasi pembebanan, yaitu kombinasi metode ultimit yang mengacu pada SNI 1726-2019, Pasal 4.2.2 dan kombinasi metode layan yang mengacu pada SNI 1726-2019, Pasal 4.2.3.

2.5.7.1 Kombinasi Metode Ultimit

Kombinasi pembebanan dasar untuk metode ultimit digunakan beberapa kombinasi sebagai berikut.

1. $1,4 D$
2. $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
3. $1,2 D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (1,0 L \text{ atau } 0,5 W)$
4. $1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
5. $0,9 D + 1,0 W$

Apabila kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik, maka dapat digunakan kombinasi sebagai berikut.

6. $1,2 D + E_v + E_h + L$
7. $0,9 D + E_v + E_h$

Dimana:

$$E_h = \rho \cdot Q_E \quad (2.27)$$

$$E_v = 0,2 \cdot S_{DS} \cdot D \quad (2.28)$$

Faktor beban L pada kombinasi 3, 4, dan 6 diizinkan diambil sama dengan 0,5 untuk semua fungsi ruang apabila L_0 dalam SNI 1727-2019 kurang dari sama dengan $4,78 \text{ kN/m}^2$, kecuali garasi atau ruang pertemuan publik.

2.5.7.2 Kombinasi Metode Layat

Kombinasi pembebanan dasar untuk metode layat dapat digunakan beberapa kombinasi sebagai berikut.

1. D
2. $D + L$
3. $D + (L_r \text{ atau } R)$
4. $D + 0,75 (L_r \text{ atau } R)$
5. $D + 0,6 W$
6. $D + 0,75 (0,6 W) + 0,75 L + 0,75 (L_r \text{ atau } R)$
7. $0,6 D + 0,6 W$

Apabila kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik, maka dapat digunakan kombinasi sebagai berikut.

$$8. D + 0,7 E_v + 0,7 E_{mh}$$

$$9. D + 0,525 E_v + 0,25 E_{mh} + 0,75 L$$

$$10. 0,6 D - 0,7 E_v + 0,7 E_{mh}$$

Dimana:

$$E_{mh} = \Omega_0 \cdot Q_E \quad (2.29)$$

$$E_v = 0,2 \cdot S_{DS} \cdot D \quad (2.30)$$

2.6 Perencanaan Elemen Struktur

2.6.1 Perencanaan Kolom

Menurut (Edward G Nawy, 1985) kolom merupakan batang tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktur yang memikul beban pada balok. Beban yang dibawa dari elevasi atas turun ke elevasi yang lebih rendah sampai akhirnya sampai ke tanah melalui fondasi. Dikarenakan kolom bersifat tekan, maka keruntuhan pada kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan runtuhnya (*collapse*) lantai yang bersangkutan, dan juga runtuh batas total (*ultimate total collapse*) seluruh strukturnya.

2.6.1.1 Preliminary Design Kolom

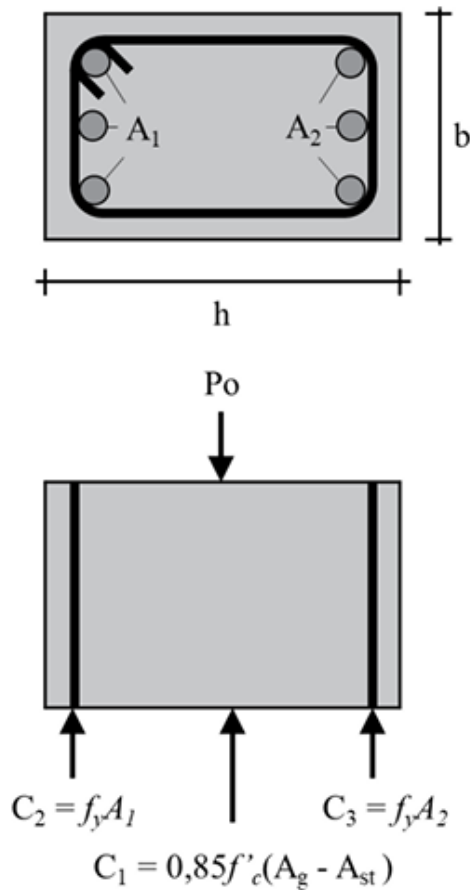
Kolom didesain untuk menahan gaya aksial beban terfaktor pada semua lantai dan atap. Perhitungan gaya aksial menggunakan metode perlimpahan beban yang berasal dari pelat dan balok. Luasan penampang akan dihitung dengan persamaan (1.31), dengan nilai ϕ diambil sesuai pada SNI 2847-2019, Pasal 21.

$$\sigma = \frac{P}{A_g} \rightarrow \sigma = \phi \cdot f'_c \rightarrow A_g = \frac{P_u}{0,3 \cdot f'_c} \quad (2.31)$$

Dari SNI 2847-2019, Pasal 18.7.2.1, menyebutkan bahwa batasan dimensi penampang kolom tidak boleh kurang dari 300 mm dan rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2.6.1.2 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan Sentris

Apabila kolom menerima beban tekan sentris seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5, berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 22.4.2.2, kuat dari kolom (P_o) dihitung dengan persamaan (2.32). Rasio tulangan harus dalam rentang 1% - 8%.



Gambar 2.5 Kolom dengan Beban Tekan Sentris

$$P_o = 0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (2.32)$$

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} \quad (2.33)$$

Keterangan:

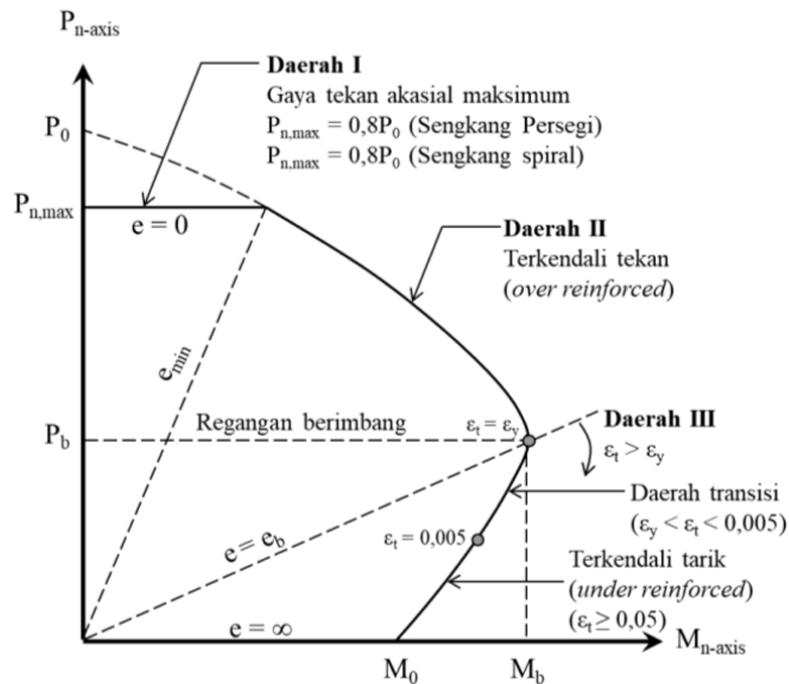
A_g = luasan penampang kolom

A_{st} = luasan tulangan longitudinal kolom

Kekuatan tekan aksial nominal (P_n) tidak boleh melebihi $P_{n,max}$, $0,80P_o$ untuk sengkang persegi dan $0,85P_o$ untuk sengkang spiral.

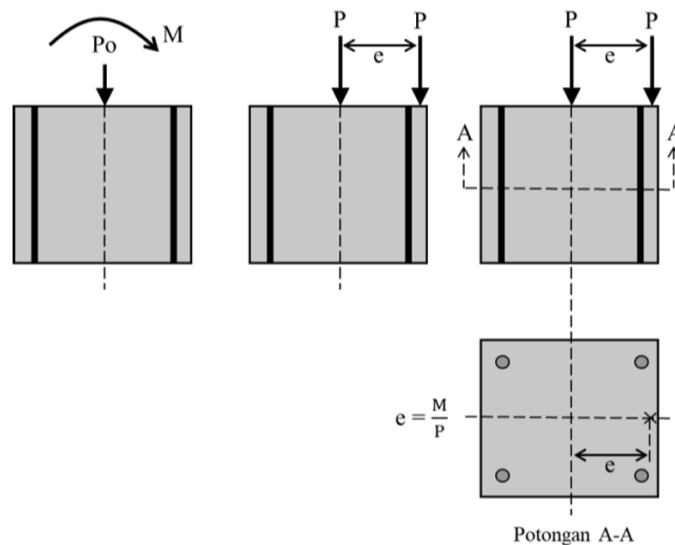
2.6.1.3 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan dan Momen

Interaksi dari gaya aksial tekan (P) dan momen (M) ditunjukkan dalam sebuah kurva yang kemudian dikenal dengan diagram interaksi P-M elemen kolom, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram Interaksi P-M Elemen Kolom

Ketika kolom menerima beban tekan eksentris, maka kolom akan menerima pengaruh tekan sekaligus momen. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengaruh Tekan pada Kolom

Perhitungan nilai tekan aksial pada saat kondisi regangan berimbang dapat dihitung dengan persamaan (2.34). Kemudian persamaan momen akibat gaya eksentrisitas dapat dihitung dengan persamaan (2.35).

$$P_b = 0,85f'_c\beta_1c_b b + A'_s(f_y - 0,85f'_c) - A_s f_y \quad (2.34)$$

$$M_b = P_b \cdot e_b = C_c \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T d'' \quad (2.35)$$

Berdasarkan Gambar 2.6, untuk mendesain kekuatan kolom dibagi menjadi tiga daerah. Semua penampang yang termasuk terkendali tekan mempunyai faktor reduksi $\phi = 0,65$ (sengkan persegi) dan $\phi = 0,75$ (sengkan spiral). Selanjutnya pada daerah transisi mempunyai faktor reduksi 0,65-0,9 (sengkan persegi) dan 0,75-0,9 (sengkan spiral). Sedangkan untuk penampang terkendali tarik mempunyai faktor reduksi $\phi = 0,9$.

2.6.1.4 Desain Geser pada Kolom

Nilai V_c diambil yang terkecil dari persamaan (2.36) s/d persamaan (2.38). Selanjutnya untuk persamaan (2.37) tidak perlu digunakan apabila $M_u - N_u (4h - d)/8 \leq 0$.

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.36)$$

$$V_c = \left[0,16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.37)$$

$$V_c = 0,29 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29 N_u}{A_g}} \quad (2.38)$$

Keterangan:

N_u, V_u, M_u = gaya aksial, gaya geser, dan momen terfaktor

d = 0,8h

Terkait kebutuhan tulangan geser pada kolom, perhitungan dan konsep sama seperti pada balok. Kebutuhan tulangan geser ditandai dengan persamaan (2.39).

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.39)$$

2.6.1.5 Syarat Perencanaan Kolom SRPMK

Syarat perencanaan kolom Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPMK) diatur pada SNI 2847-2019, Pasal 18.7.

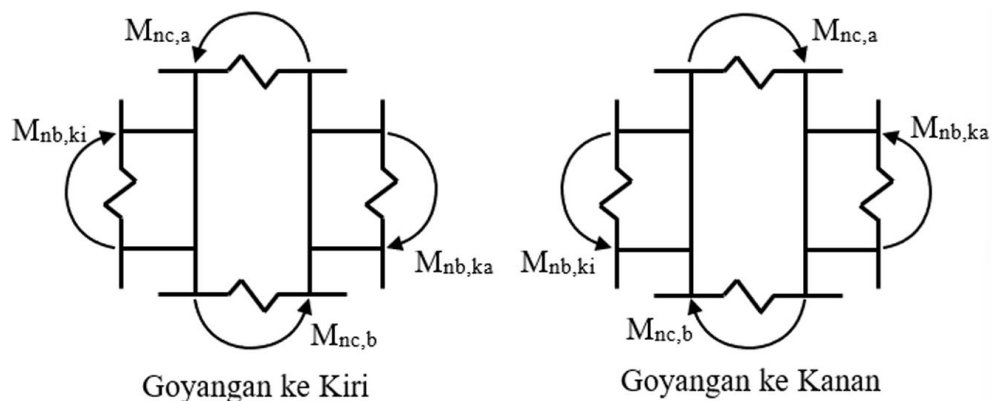
1. Syarat Dimensi Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.7.2.1 disyaratkan bahwa dimensi kolom harus memenuhi poin 1 hingga 2.

- 1) Dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri, tidak kurang dari 300 mm.
- 2) Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2. Syarat Kekuatan Dimensi Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.7.2.1 disyaratkan bahwa kekuatan dimensi kolom harus memenuhi persamaan (2.40).



Gambar 2.8 Konsep *Strong Column - Weak Beam* (SCWB)

$$\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb} \quad (2.40)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = jumlah kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka kedalam join, yang dievaluasi di muka-muka join

$\sum M_{nb}$ = jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam join, yang dievaluasi di muka-muka join

Ketentuan pada pasal ini umumnya dikenal dengan istilah *Strong Column - Weak Beam* (SCWB). Kondisi dimana perlu dipastikan bahwa kekuatan nominal kolom lebih besar 1,2 kali dari kekuatan nominal balok.

3. Syarat Tulangan Longitudinal Kolom SRPMK

Pada SNI 2847-2019, Pasal 18.7.4 disyaratkan bahwa tulangan longitudinal harus mempertimbangkan beberapa poin berikut:

- a. Luas tulangan longitudinal A_{st} tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$.
- b. Pada kolom-kolom dengan sengkang bundar, jumlah batang tulangan longitudinal minimum harus 6.
- c. Sambungan mekanis harus memenuhi Pasal 18.2.7 dan sambungan las Pasal 18.2.8. Sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom dan harus didesain sebagai sambungan lewatan tarik dan harus dilingkupi tulangan transversal yang memenuhi Pasal 18.7.5.2 dan Pasal 18.7.5.3.

4. Syarat Tulangan Transversal Kolom SRPMK

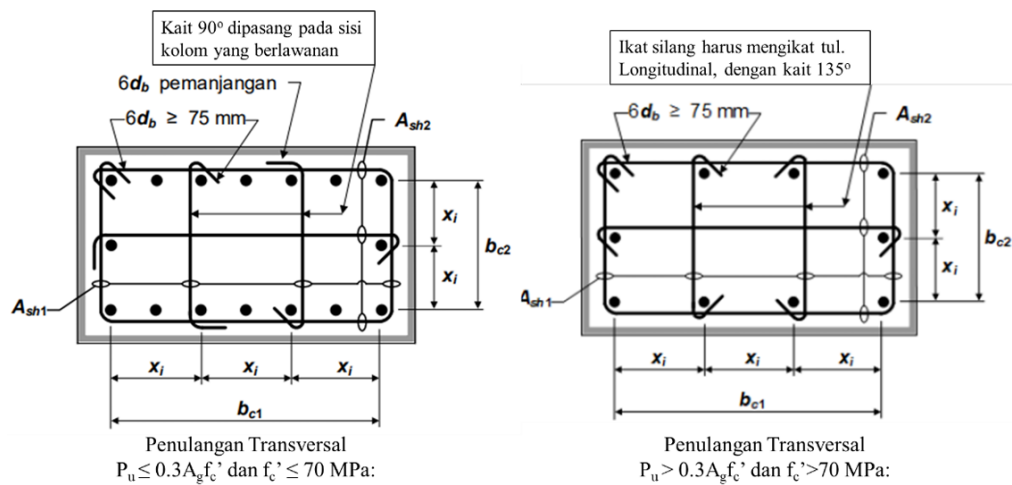
Pada SNI 2847-2019; Pasal 18.7.5.1 disyaratkan bahwa tulangan transversal harus dipasang sepanjang I_0 dari masing-masing muka join, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Adapun, panjang I_0 tidak boleh kurang terhadap nilai terbesar dari tiga ketentuan berikut:

- a. Tinggi kolom pada muka join atau pada penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
- b. Satu per enam ($1/6$) tinggi bersih kolom.
- c. 450 mm.

Kemudian, berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.7.5.2 disyaratkan tulangan transversal harus sesuai dengan ketentuan berikut:

- a. Tulangan transversal harus terdiri dari spiral tunggal atau spiral saling tumpuk (*overlap*), sengkang pengekan bundar, atau sengkang pengekan persegi, dengan atau tanpa ikat silang.
- b. Setiap tekukan ujung sengkang pengekan persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar.
- c. Ikat silang yang berurutan harus diselang selang ujungnya sepanjang tulangan longitudinal dan sekeliling perimeter penampang.
- d. Apabila $P_u \leq 0.3A_g f_c'$ dan $f_c' \leq 70$ MPa, maka harus ada ≥ 1 kait per 2 tulangan longitudinal bersebelahan dan $h_x \leq 350$ mm. Kemudian apabila P_u

$> 0.3A_g f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa, maka tiap tulangan longitudinal harus diberi kait dan $h_x \leq 200$ mm. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Contoh Penulangan Transversal pada Kolom

Selain itu, spasi tulangan transversal pada daerah I_0 diatur dalam SNI 2847 2019, Pasal 18.7.5.3, dimana spasi tulangan transversal tidak melebihi nilai terkecil dari tiga ketentuan berikut:

- Seperempat (1/4) dimensi terkecil penampang kolom.
- Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil ($6d_b$)
- S_0 ditentukan dengan persamaan (2.41). Nilai S_0 tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak perlu kurang dari 100 mm.

$$100\text{mm} \leq \left(S_0 = 100 + \frac{350 - h_x}{3} \right) < 150\text{mm} \quad (2.41)$$

Selanjutnya, jumlah tulangan transversal harus sesuai dengan Tabel 2.19. Hal ini diatur dalam SNI 2847-2019, Pasal 18.7.5.4.

Tabel 2.19 Tulangan Transversal untuk Kolom SRPMK

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang Berlaku	
Ash/s.bc Untuk sejangkang pengekang persegi	$P_u \leq 0,3A_g \cdot f'_c$ dan $f'_c \leq 70$ MPa	Terbesar dari (a) dan (b)	$0,3 \cdot \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}} \text{ (a)}$
	$P_u \leq 0,3A_g \cdot f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa	Terbesar dari (a), (b), dan (c)	$0,09 \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}} \text{ (b)}$ $0,2 \cdot k_f \cdot k_n \cdot \frac{P_u}{f_{yt} \cdot A_{ch}} \text{ (c)}$

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang Berlaku	
ρ_s untuk spiral ataupun senggang pengekang lingkaran	$P_u \leq 0,3A_g \cdot f'_c$ dan $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (d) dan (e)	$0,45 \cdot \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}} \text{ (d)}$ $0,09 \cdot \frac{f'_c}{f_{yt}} \text{ (e)}$
	$P_u \leq 0,3A_g \cdot f'_c$ dan $f'_c > 70 \text{ MPa}$	Terbesar dari (d), (e), dan (f)	$0,35 \cdot k_f \cdot \frac{P_u}{f_{yt} \cdot A_{ch}} \text{ (f)}$

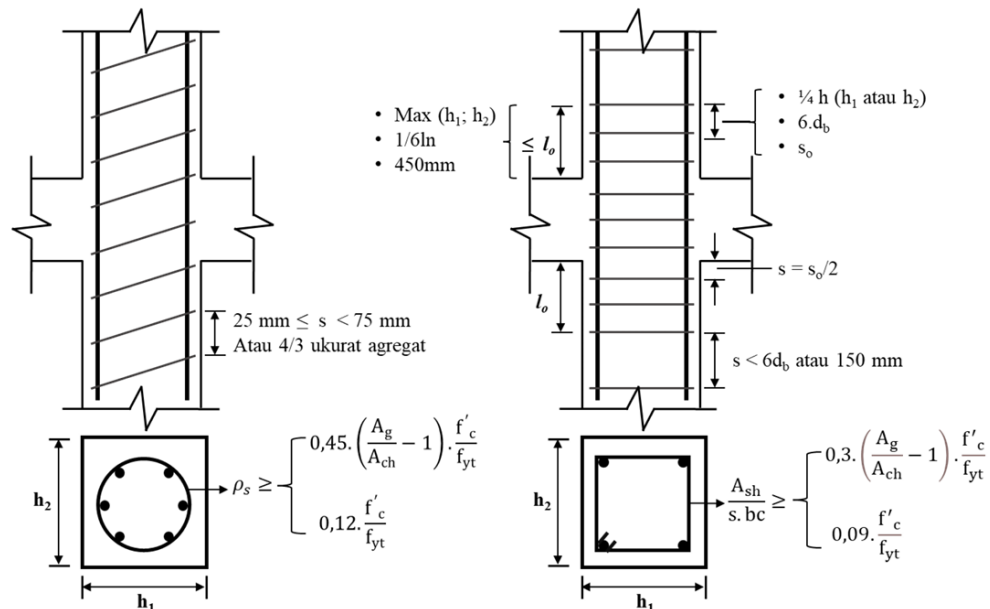
Faktor kekuatan beton (k_f) dan faktor keefektifan pengekangan (k_n) dihitung berdasarkan persamaan (2.42) dan persamaan (2.43).

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 \geq 1,0 \quad (2.42)$$

$$k_n = \frac{n_1}{n_1 - 2} \quad (2.43)$$

Dimana n_1 adalah jumlah batang atau bundel tulangan longitudinal di sekeliling inti kolom dengan sengkang persegi yang ditumpu secara lateral oleh sudut dari sengkang pengekang atau kait seismik.

Kemudian, spasi di luar panjang l_0 diatur dalam SNI 2847-2019, Pasal 18.7.5.5. Kolom harus diberi tulangan spiral atau sengkang dengan spasi (s) tidak melebihi nilai terkecil dari $6.d_b$ dan 150 mm , kecuali bila jumlah tulangan transversal yang lebih besar disyaratkan oleh Pasal 18.7.4.3 atau Pasal 18.7.6.



Gambar 2.10 Persyaratan Tulangan Transversal untuk Senggang Spiral dan Senggang Tertutup Persegi

5. Syarat Kekuatan Geser Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.7.6.1.1 disyaratkan bahwa kekuatan geser kolom SRPMK harus mengikuti ketentuan berikut :

- a. Gaya geser desain (V_e) harus dihitung dari tinjauan gaya-gaya maksimum yang dapat terjadi di muka join pada setiap ujung kolom. Gaya pada join ini harus ditentukan menggunakan kekuatan lentur maksimum yang mungkin terjadi (M_{pr}) di setiap ujung kolom yang terkait dengan rentang beban aksial terfaktor (P_u) yang bekerja pada kolom, seperti pada gambar. Gaya geser desain dari kolom berdasarkan kapasitas kolom yang akan digunakan untuk menentukan tulangan geser dihitung menggunakan persamaan (2.44).

$$V_e = \frac{M_{pr3} + M_{pr4}}{I_u} \quad (2.44)$$

Keterangan:

V_e = gaya geser desain

$M_{pr3,4}$ = momen maksimum kolom pada bagian ujung atas/bawah kolom berdasarkan tulangan kolom yang terpasang. Dalam perhitungan $M_{pr3,4}$ mutu baja tulangan longitudinal (f_y) dan faktor reduksi (ϕ) harus disesuaikan dengan ketentuan masing-masing jenis struktur

I_u = tinggi bersih dari kolom

- b. Gaya geser kolom (V_e) yang diperoleh dari persamaan (2.44) tidak perlu melebihi nilai geser yang dihitung dari kekuatan join berdasarkan M_{pr} balok yang merangka ke join ($V_{e-dari\ balok}$), yang dihitung dengan persamaan (2.46).

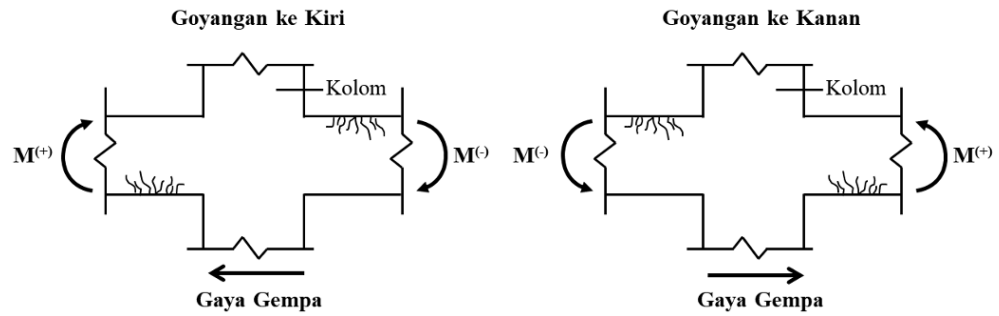
$$V_e = \frac{\sum M_{nb}}{I_n} \quad (2.45)$$

Keterangan:

V_e = gaya geser desain

$\sum M_{nb}$ = jumlah momen kapasitas balok pengekang

I_n = bentang bersih dari balok



Gambar 2.11 Konsep Perhitungan Momen Kapasitas Balok

- c. Nilai geser kolom (V_e) tidak boleh kurang dari geser terfaktor berdasarkan analisis struktur ($V_{e\text{-dari ETABS}}$).

Berdasarkan penjelasan pada poin di atas maka dapat dikatakan bahwa besaran geser desain kolom dikontrol oleh dua nilai yaitu gaya geser dari pengaruh balok dan gaya geser dari analisis struktur. Bentuk sederhananya dapat ditulis seperti pada persamaan (2.46).

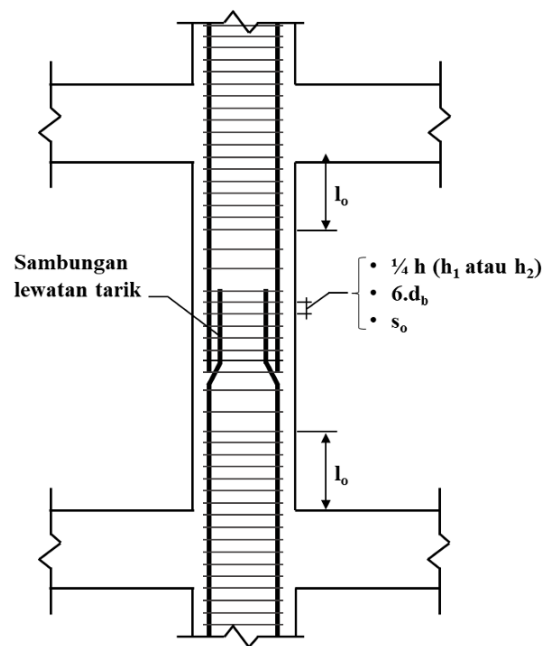
$$V_{e\text{-dari ETABS}} \leq V_{e\text{-dari kolom}} < V_{e\text{-dari balok}} \quad (2.46)$$

Apabila persyaratan pada persamaan (2.46) terpenuhi, maka nilai $V_{e\text{-dari kolom}}$ akan dianggap sebagai nilai geser desain ($V_u = V_e$). Kemudian apabila persyaratan di atas tidak terpenuhi, maka diambil nilai batas maksimum ($V_{e\text{-dari balok}}$) atau minimum ($V_{e\text{-dari ETABS}}$). Selain itu, dalam SNI 2847-2019, Pasal 18.7.6.2, tulangan transversal sepanjang l_0 berdasarkan Pasal 18.7.5.1, harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan $V_c = 0$ bila poin 1 dan 2 terjadi:

- Gaya geser akibat gempa berdasarkan Pasal 18.7.6.1 setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum di sepanjang l_0 .
- Gaya tekan aksial terfaktor P_u termasuk pengaruh gempa kurang dari $A_g \cdot f'_c / 20$.

6. Syarat Sambungan Lewatan Kolom SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.7.4.3 diatur bahwa sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom dan harus didesain sebagai sambungan tarik dan jarak tulangan sengkang terpasang sama dengan sengkang yang terpasang pada daerah l_0 (sendi plastis).



Gambar 2.12 Sambungan Lewatan Pada Kolom SRPMK

2.6.2 Perencanaan Balok

Balok beton adalah bagian dari struktur yang berfungsi sebagai pengikat kolom apabila pergerakan kolom tetap bersatu padu mempertahankan bentuk dan posisi semula (Astri et al., 2022)

Balok merupakan bagian dari suatu konstruksi bangunan yang kaku serta memiliki fungsi untuk memikul beban yang diterima oleh pelat beban balok anak serta beban yang bekerja di atasnya dan meneruskannya pada elemen kolom. Balok juga berfungsi sebagai pengikat kolom lantai atas ke dalam diafragma lantai dan juga balok dapat digunakan untuk memperkuat struktur arah horizontal.

2.6.2.1 Preliminary Design Balok

Tinggi minimum balok (h) dapat ditentukan berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 9.3.1. Adapun detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.20. Kemudian untuk lebar minimum dari balok sesuai Pasal 18.6.2, yaitu minimum lebar balok (b_w) harus sekurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm.

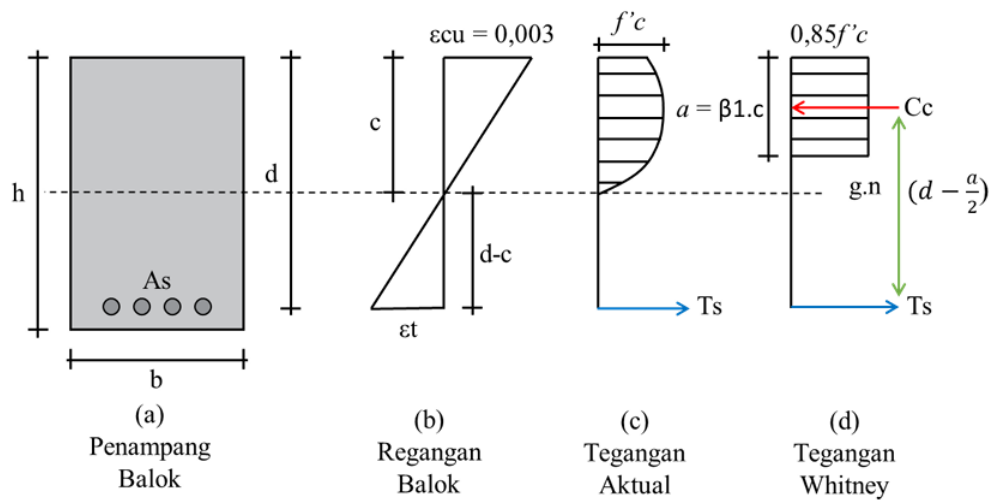
Tabel 2.20 Tinggi Minimum Balok

Kondisi Perletakan	Tinggi Minimum Balok (h)
Perletakan sederhana	1/16
Menerus satu sisi	1/18,5
Menerus dua sisi	1/21
Kantilever	1/8

2.6.2.2 Kuat Lentur Balok

1. Tulangan Tunggal (*single reinforced*)

Detail terkait perilaku lentur balok tulangan tunggal berdasarkan tegangan regangan akibat momen lentur yang bekerja dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kondisi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Tunggal

Berdasarkan Gambar 2.13(b), nilai regangan tulangan tarik dapat dihitung dengan persamaan (2.47). Kemudian untuk regangan leleh tulangan tarik dengan $f_y = 400$ MPa dan $E = 200000$ MPa, dapat dihitung dengan persamaan (2.48).

$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \epsilon_{cu} \quad (2.47)$$

$$\epsilon_{ty} = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002 \quad (2.48)$$

Keterangan:

ϵ_{cu} = regangan maksimum serat tekan penampang beton (0,003)

ϵ_t = regangan tulangan tarik netto

ε_{ty} = regangan leleh tulangan tarik

d_t = jarak tulangan tarik terluar dari penampang balok

Dalam SNI 2847-2019 terdapat tiga jenis penampang beton bertulang berdasarkan besaran regangannya (ε_t), yaitu:

$\varepsilon_t = \varepsilon_{ty}$: Kondisi regangan berimbang (*balance*)

$\varepsilon_t = \varepsilon_{ty}$: Penampang terkendali tekan (*over reinforced*); keruntuhan getas

$\varepsilon_t = \varepsilon_{ty}$: Penampang terkendali tarik (*under reinforced*); keruntuhan daktail

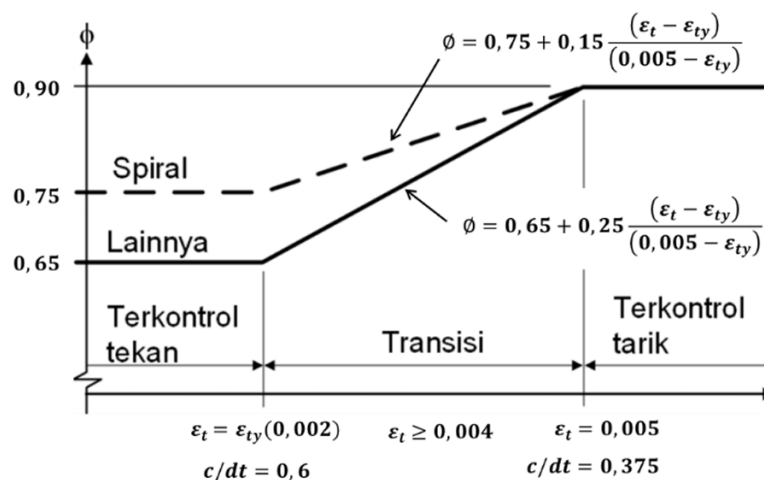
Parameter ε_t bisa juga diganti dengan c/d_t . Sehingga berdasarkan Gambar 2.13(b), nilai parameter c/d_t dapat dihitung dengan persamaan (2.50).

$$\varepsilon_t = 0,005 \quad (2.49)$$

$$\frac{c}{d_t} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_t} = \frac{0,003}{0,003 + 0,005} = 0,375 \quad (2.50)$$

Adanya fenomena perilaku tersebut, maka akan berpengaruh pada nilai faktor reduksi (ϕ) yang akan digunakan selama proses desain. Nilai faktor reduksi tersebut dibagi menjadi dua berdasarkan sengkang yang digunakan. Hal ini diatur dalam SNI 2847-2019, Pasal 21.2.2, seperti yang terlihat pada Gambar 2.14.

Selanjutnya adalah distribusi tegangan tekan pada penampang balok dapat dilihat pada Gambar 2.13(c), yang kemudian disederhanakan oleh Whitney seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13(d). Nilai β_1 diatur dalam SNI 2847-2019, seperti yang ada pada Tabel 2.21. Kapasitas momen nominal (M_n) dapat dihitung berdasarkan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok. Kemudian nilai gaya aksial tekan balok (P_u) harus kurang dari $0,1 A_g f'_c$.



Gambar 2.14 Variasi Nilai Faktor Reduksi

Dalam mendesain elemen balok beton bertulang, diusahakan supaya balok yang didesain tergolong dalam penampang terkendali tarik (*under reinforced*).

Tabel 2.21 Nilai β_1 untuk Distribusi Tegangan Ekuivalen

f'_c (MPa)	β_1
$17 \leq f'_c \leq 28$	0,85
$28 < f'_c < 55$	$0,85 - \frac{0,05(f'_c - 28)}{7}$
$f'_c \geq 55$	0,65

Gaya tekan dari beton (C_c):

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.51)$$

Gaya tarik dari tulangan (T_s):

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (2.52)$$

Momen nominal (M_n):

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.53)$$

$\sum H = 0$, $C_c = T_s$; maka nilai tinggi blok tegangan tekan (a):

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.54)$$

Luas tulangan (A_s):

$$A_s = \rho b d \quad (2.55)$$

Koefisien kapasitas penampang (R_n):

$$R_n = \frac{M_n}{b d^2} \quad (2.56)$$

Rasio tulangan (ρ):

$$\rho = 0,85 \frac{f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0,85 f'_c}} \right) \quad (2.57)$$

Rasio tulangan berimbang (ρ_b):

$$\rho_b = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.58)$$

Batas maksimum rasio tulangan (ρ_{maks}):

$$\rho_{maks} = \frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \epsilon_t} \rho_b \quad (2.59)$$

atau sesuai dengan SNI 2847-2019, Pasal 18.6.3.1, (ρ_{maks}):

$$\rho_{maks} = 0,025 \quad (2.60)$$

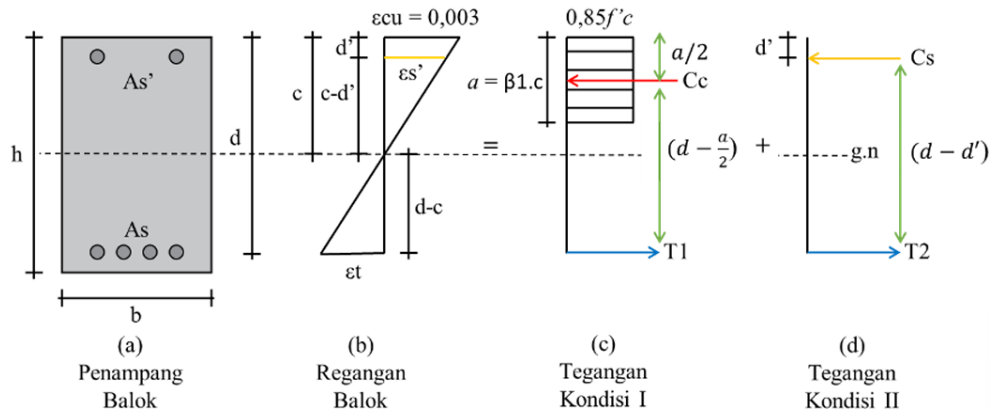
Batas minimum rasio tulangan (ρ_{min}), diambil nilai terbesar:

$$\rho_{\min} = \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} \quad (2.61)$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.62)$$

2. Tulangan Rangkap (*double reinforced*)

Detail terkait perilaku lentur balok tulangan rangkap berdasarkan tegangan-regangan akibat momen lentur yang bekerja dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Kondisi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Rangkap

Dalam tulangan rangkap balok memiliki tulangan tekan (A_s'), sehingga terdapat parameter gaya tekan (C_s). Kemudian pada analisis nilai gaya tekan tulangan tarik (T) dibagi menjadi T_1 (kondisi I) dan T_2 (kondisi II), atau dapat ditulis $T = T_1 + T_2$. Momen nominal pada kondisi I dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

Gaya tekan pada beton (C_c):

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \quad (2.63)$$

Gaya tarik pada tulangan (T_1):

$$T_1 = A_{s1} f_y \quad (2.64)$$

Momen nominal pada kondisi I (M_{n1}):

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.65)$$

Dimana luas tulangan tarik (A_s):

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.66)$$

Sedangkan Momen nominal pada kondisi II dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

Gaya tarik dari tulangan (T_2):

$$T1 = A_{s2}f_y \quad (2.67)$$

Gaya tekan dari tulangan (Cs):

$$C_s = A'_s f'_s \quad (2.68)$$

Momen nominal pada kondisi II (M_{n2}), dimana $T2 = C_s$ dan f'_s merupakan tegangan leleh pada tulangan tekan (A'_s):

$$M_{n2} = A'_s f'_s (d - d') \quad (2.69)$$

Dimana luas tulangan tekan (A'_s):

$$A'_s = A_{s2} \quad (2.70)$$

Berdasarkan kondisi I dan kondisi II, maka dapat diperoleh momen nominal (M_n) untuk balok beton bertulang tulangan rangkap, sebagai berikut:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.71)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.72)$$

$$C_c = C_s - T = (A'_s f'_s) - (A_{s1} f_y) \quad (2.73)$$

$$M_n = [(A'_s f'_s) - (A_{s1} f_y)] \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s f'_s) (d - d') \quad (2.74)$$

Dalam analisis apabila $M_{n1} < M_n$, maka diperlukan tulangan tekan (digunakan perhitungan tulangan rangkap). Sedangkan apabila $M_{n1} > M_n$, maka tidak diperlukan tulangan tekan (digunakan perhitungan tulangan tunggal). Kemudian dalam analisis tulangan rangkap, terdapat kondisi tulangan tekan sudah leleh ($f'_s > f_y$) sehingga tegangan leleh pada tulangan tekan diambil sama dengan f_y . Kondisi yang kedua tulangan tekan belum leleh ($f'_s < f_y$) sehingga tegangan leleh pada tulangan tekan tetap f'_s . Nilai tegangan tulangan tekan (f'_s) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.76).

$$\epsilon'_s = 0,003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.75)$$

$$f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s = 600 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.76)$$

2.6.2.3 Kuat Geser Balok

Perhitungan kuat geser nominal (V_n) merupakan penjumlahan kuat geser beton (V_c) dan tulangan geser (V_s). Seperti pada persamaan (2.77).

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.77)$$

Dalam metode desain kuat geser balok berdasarkan SNI 2847-2019, persyaratan geser nominal seperti pada persamaan (2.78). Dimana faktor reduksi $\phi=0,75$.

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.78)$$

Kemudian dimensi penampang balok harus mampu memikul beban geser dengan persyaratan seperti pada persamaan (2.79). Apabila tidak memenuhi syarat, dimensi penampang harus diperbesar.

$$V_u \leq \phi V_n = \phi (V_c + 0,66\sqrt{f'_c}b_wd) \quad (2.79)$$

Mu dan Vu terjadi secara serentak pada penampang balok ketika menerima pembebanan, dan terdapat persyaratan seperti pada persamaan (2.80).

$$\frac{V_{u,d}}{M_u} < 1,0 \quad (2.80)$$

Nilai kuat geser beton (V_c) sesuai pada SNI-2847-2019, Pasal 22.5.5.1 atau yang lebih detail berdasarkan Tabel 22.5.5.1 yang kemudian diambil nilai terkecil. Adapun detailnya seperti persamaan (2.81) sampai persamaan (2.84).

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (2.81)$$

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_{u,d}}{M_u}\right)b_wd \quad (2.82)$$

$$V_c = (0,16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w)b_wd \quad (2.83)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (2.84)$$

Keterangan:

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal = 1,0

ρ_w = rasio tulangan tarik ($A_s/b_w.d$)

V_u = gaya geser ultimit hasil analisis struktur (N)

M_u = momen ultimit hasil analisis struktur (Nmm)

b_w = lebar penampang balok (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

Tulangan geser (V_s) apabila digunakan tulangan geser dengan posisi tegak lurus ($\alpha = 90^\circ$), maka digunakan persamaan (2.85).

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} < V_{s, \max} = 0,66 \sqrt{f'c} b_w d \quad (2.85)$$

Rasio luas tulangan geser (A_v) dengan jarak tulangan geser (s) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.86), dimana (n) merupakan jumlah kaki tulangan geser (sengkang).

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_{yt} d} \quad (2.86)$$

$$A_v = n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi D^2 \quad (2.87)$$

Jumlah luasan minimum ($A_{v, \min}$) untuk tulangan geser juga harus dipertimbangkan, maka dari itu nilai A_v diambil nilai terbesar.

$$\frac{A_{v, \min}}{s} = 0,062 \sqrt{f'c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.88)$$

$$\frac{A_{v, \min}}{s} = \frac{0,35 b_w s}{f_{yt}} \quad (2.89)$$

Dalam menentukan jarak tulangan geser (s), nilai jarak maksimum juga harus dipertimbangkan. Kemudian diambil nilai terkecil.

$$V_s \leq V_{c1} = 0,33 \sqrt{f'c} b_w d ; S_{\max} = d/2 \text{ atau } 600 \text{ mm} \quad (2.90)$$

$$V_s \leq V_{c1} = 0,33 \sqrt{f'c} b_w d ; S_{\max} = d/4 \text{ atau } 300 \text{ mm} \quad (2.91)$$

Terdapat beberapa kategori yang digunakan dalam menentukan kebutuhan tulangan geser balok berdasarkan gaya geser ultimit. Untuk $V_u < 0,5 \phi V_c$, tulangan geser tidak perlu dipasang, kemudian apabila $0,5 \phi V_c < V_u < \phi V_c$, digunakan tulangan geser dengan nilai V_s dan A_v yang digunakan merupakan nilai minimal. Selanjutnya apabila $V_u > \phi V_c$, digunakan tulangan geser dengan mengambil nilai terbesar dari V_s dan A_v yang ada.

2.6.2.4 Momen Torsi Balok

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 22.7.1.1 pengaruh torsi pada penampang balok (T_u) dapat diabaikan apabila persyaratan pada persamaan (2.92) terpenuhi.

$$\phi T_{th} = T_u \quad (2.92)$$

$$T_{th} = 0,083\lambda\sqrt{f'c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.93)$$

Keterangan:

T_u = nilai torsi terfaktor dari hasil analisis struktur (Nmm)

T_{th} = nilai torsi *threshold* (Nmm)

ϕ = faktor reduksi (0,75)

λ = faktor modifikasi, untuk beton normal = 1,0

A_{cp} = luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton (m²)

P_{cp} = keliling luar penampang beton (mm)

Terdapat batasan penampang balok dalam pengaruh torsi, hal ini diatur pada SNI 2847-2019, Pasal c. Adapun persamaannya dapat dilihat pada persamaan

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0,66\sqrt{f'c} \right) \quad (2.94).$$

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0,66\sqrt{f'c} \right) \quad (2.94)$$

Keterangan:

A_{oh} = luas daerah dalam tulangan geser (mm²)

P_h = keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

Kondisi $d \geq 0,85$; yang dimana h merupakan tinggi penampang balok. Apabila penampang tidak memenuhi persyaratan maka dimensi penampang perlu diperbesar. Kuat nominal torsi (T_n) diatur dalam SNI 2847-2019, Pasal 22.7.6.1. Nilai T_n diambil dari nilai minimum antara persamaan (2.95) dan persamaan (2.96).

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.95)$$

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_y}{P_h} \cot \theta \quad (2.96)$$

Keterangan:

- T_n = kuat nominal torsi nominal (Nmm)
 A_0 = Luas bruto yang dilingkup oleh lintasan alir geser, $A_0 = 0,85A_{oh}$ (mm²)
 A_t = luas 1 kaki sengkang tertutup yang menahan torsi dalam spasi s (mm²)
 A_l = kuat momen torsi nominal (Nmm)
 f_{yt} = kuat leleh tulangan transversal (MPa)
 f_y = kuat leleh tulangan yang disyaratkan (MPa)
 s = spasi tulangan transversal yang terpasang (mm)
 θ = 45°, untuk balok beton non prategang

Pengaruh torsi diproyeksikan pada tulangan transversal dan tulangan torsi memanjang. Jumlah luasan minimal dari tulangan tersebut diatur pada SNI 2847-2019, yaitu :

1. Tulangan transversal (torsi)

Luasan minimum yang diambil harus lebih besar dari persamaan (2.97) dan persamaan (2.98).

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,062 \sqrt{f'c} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.97)$$

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,35 \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.98)$$

Nilai A_v didapatkan dari luasan tulangan geser yang dihitung dengan persamaan geser. Adapun nilai A_t dapat diperoleh dengan persamaan (2.99).

$$A_t = \frac{T_u \cdot s}{\phi 2 A_0 f_{yt}} \tan \theta \quad (2.99)$$

2. Tulangan longitudinal (torsi)

Luasan tulangan longitudinal (A_l), dapat dihitung menggunakan persamaan (2.100) atau persamaan (2.101).

$$A_l = \left(\frac{A_t}{s} \right) Ph \left(\frac{f_{yt}}{f_y} \right) \cot^2 \theta \quad (2.100)$$

$$A_l = \frac{T_u \cdot Ph}{\phi 2 A_0 f_y} \cot \theta \quad (2.101)$$

Luasan minimum tulangan ($A_{l,\min}$) harus lebih kecil dari persamaan (2.102) dan persamaan (2.103).

$$A_{l,\min} = 0,42 \sqrt{f'c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) Ph \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.102)$$

$$A_{1,min} = 0,42\sqrt{f'c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0,175b_w}{f_{yt}} \right) Ph \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.103)$$

Selanjutnya mengenai batasan spasi tulangan torsi, diatur pada SNI 2847-2019. Tulangan transversal sesuai pada persamaan (2.104) dan tulangan longitudinal sesuai pada persamaan (2.105).

$$s \leq \frac{Ph}{8} \leq 300 \text{ mm} \quad (2.104)$$

$$s \leq (bt - d) \quad (2.105)$$

Dalam analisis torsi terdapat batasan mutu material, yaitu mutu beton bertulang $\sqrt{f'c} \leq 8,3 \text{ MPa}$. Kemudian mutu tulangan harus memenuhi syarat, f_y atau $f_{yt} \leq 420 \text{ MPa}$.

2.6.2.5 Syarat Perencanaan Balok SRPMK

Syarat perencanaan balok Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPMK) diatur pada SNI 2847-2019, Pasal 18.6.

1. Syarat Dimensi Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.6.2.1 disyaratkan bahwa dimensi balok harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Bentang bersih (l_n), tidak boleh diambil kurang dari $4d$ ($l_n \geq 4d$; d = tinggi efektif penampang balok).
- Lebar penampang balok (b_w), tidak boleh kurang dari $0,3h$ (h = tinggi penampang balok) atau tidak boleh kurang dari 250 mm ($b_w \geq 0,3 h$ atau 250 mm).
- Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75c_1$ pada masing-masing sisi kolom.

2. Syarat Tulangan Longitudinal Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.6.3, disyaratkan bahwa tulangan longitudinal balok harus mempertimbangkan beberapa poin berikut:

- Balok-balok harus memiliki setidaknya dua batang tulangan menerus pada sisi atas dan bawah penampang.
- Jumlah tulangan tidak boleh lebih dari yang di syaratkan pada Pasal 9.6.1.2 dan rasio tulangan (ρ) tidak boleh melebihi 0,025 baik untuk tulangan atas maupun bawah, atau dapat di rumus sesuai dengan persamaan (2.106).

$$\left. \begin{array}{l} \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} b_w d \\ \frac{1,4}{f_y} b_w d \end{array} \right\} \leq A_s \leq 0,025 b_w d \quad (2.106)$$

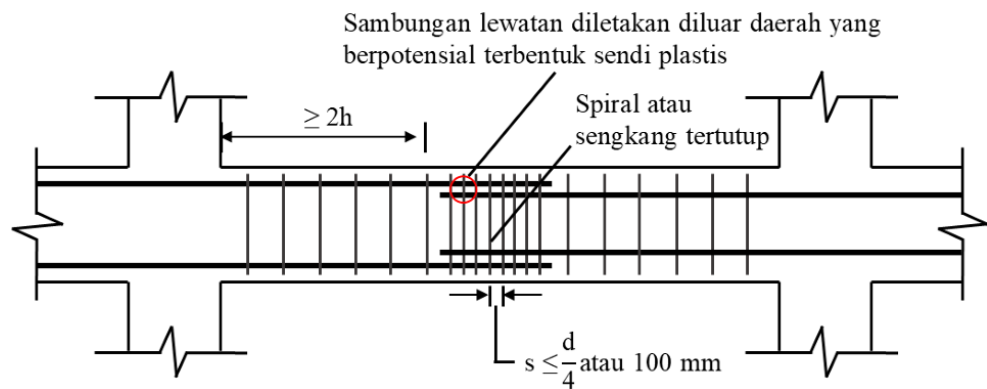
- c. Kuat momen positif (M_n^+) komponen struktur lentur pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari setengah kuat momen negatif (M_n^-) pada muka kolom tersebut atau dapat dinyatakan dalam persamaan (2.107).

$$M_n^+ \geq \frac{1}{2} (M_n^-) \quad (2.107)$$

- d. Kuat momen positif (M_n^+) dan kuat momen negatif (M_n^-) pada semua penampang di sepanjang bentang balok tidak boleh kurang dari seperempat momen maksimum pada kedua tumpuan, atau dapat dinyatakan dalam persamaan (2.108).

$$(M_n^+) \text{ atau } (M_n^-) \geq \frac{1}{4} (M_{\max}) \quad (2.108)$$

- e. Sambungan lewatan tulangan longitudinal balok diizinkan jika sengkang pengekuat dipasang sepanjang sambungan lewatan. Spasi sengkang pada daerah tersebut tidak boleh melebihi nilai terkecil dari $d/4$ dan 100 mm. Sambungan lewatan tidak boleh berada pada hubungan balok kolom dan daerah sendi plastis ($2h$), dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi sebagai akibat deformasi lateral yang melampaui perilaku elastik. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.16.



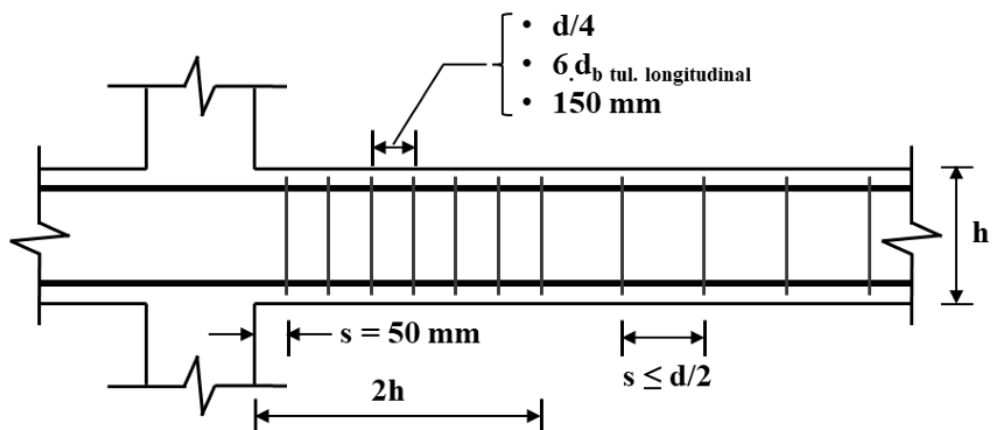
Gambar 2.16 Persyaratan Sambungan Lewatan Balok SRPMK

3. Syarat Tulangan Transversal Balok SRPMK

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.6.4, disyaratkan bahwa tulangan transversal balok harus mempertimbangkan beberapa poin berikut:

- a. Sengkang pengekan harus dipasang sepanjang jarak yang sama dengan dua kali tinggi balok ($2h$) yang diukur dari muka kolom penumpu ke arah tengah bentang kedua ujung balok. Daerah sepanjang $2h$ tersebut biasa dikenal dengan daerah sendi plastis.
- b. Sengkang pertama pada daerah $2h$ harus dipasang tidak lebih dari 50 mm dari muka kolom penumpu.
- c. Jarak tulangan sengkang sepanjang $2h$ harus dipasang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari $d/4$, $6d_b$ (d_b = diameter tulangan utama balok), dan 150 mm.
- d. Sengkang harus dipasang dengan spasi tidak lebih dari $d/2$ di sepanjang bentang balok di luar sendi plastis.

Berikut merupakan ilustrasi syarat tulangan transversal yang disajikan dalam Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Persyaratan Tulangan Transversal Balok SRPMK

- e. Sengkang pengekan pada balok diizinkan terdiri dari dua batang tulangan, yaitu sebuah sengkang yang mempunyai kait gempa pada kedua ujungnya dan ikat silang sebagai penutup. Ikat silang berurutan yang mengikat batang tulangan longitudinal yang sama harus memiliki kait 90 derajat yang dipasang selang-seling pada sisi yang berlawanan dari komponen struktur lentur.
4. Syarat Kekuatan Geser Balok SRPMK
- Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 18.6.5, disyaratkan bahwa kekuatan geser balok harus mempertimbangkan beberapa poin berikut:

- a. Gaya geser desain (V_e) harus dihitung dari tinjauan gaya-gaya pada bagian balok diantara kedua muka join. Momen-momen dengan tanda berlawanan yang terkait dengan kekuatan momen lentur maksimum yang mungkin terjadi (M_{pr}), harus diasumsikan bekerja pada muka-muka join, dan balok dibebani dengan beban gravitasi tributari terfaktor di sepanjang bentangnya. Momen-momen ujung M_{pr} berdasarkan pada tegangan tarik baja sebesar $1,25f_y$ dimana f_y kekuatan leleh yang disyaratkan. Ilustrasi gaya geser desain dapat dilihat pada Gambar 2.18.

$$W_u = 1,2D + 1,0L$$

$$M_{pr}^{+ki} \quad M_{pr}^{-ka}$$

$$V_g = \frac{W_u \cdot l_n}{2} \quad V_g = \frac{W_u \cdot l_n}{2}$$

$$V_e = \frac{M_{pr}^{+ki}}{l_n} \quad V_e = \frac{M_{pr}^{+ki}}{l_n}$$

$$V_e = \frac{M_{pr}^{-ka}}{l_n} \quad V_e = \frac{M_{pr}^{-ka}}{l_n}$$

$$V_{e,ki} = -\left(\frac{M_{pr}^{+} + M_{pr}^{-}}{l_n}\right) + \frac{W_u \cdot l_n}{2} \quad V_{e,ka} = \left(\frac{M_{pr}^{+} + M_{pr}^{-}}{l_n}\right) + \frac{W_u \cdot l_n}{2}$$

Goyangan ke kanan

$$W_u = 1,2D + 1,0L$$

$$M_{pr}^{-ki} \quad M_{pr}^{+ka}$$

$$V_g = \frac{W_u \cdot l_n}{2} \quad V_g = \frac{W_u \cdot l_n}{2}$$

$$V_e = \frac{M_{pr}^{-ki}}{l_n} \quad V_e = \frac{M_{pr}^{-ki}}{l_n}$$

$$V_e = \frac{M_{pr}^{+ka}}{l_n} \quad V_e = \frac{M_{pr}^{+ka}}{l_n}$$

$$V_{e,ki} = \left(\frac{M_{pr}^{-} + M_{pr}^{+}}{l_n}\right) + \frac{W_u \cdot l_n}{2} \quad V_{e,ka} = -\left(\frac{M_{pr}^{-} + M_{pr}^{+}}{l_n}\right) + \frac{W_u \cdot l_n}{2}$$

Goyangan ke kiri

Gambar 2.18 Gaya Geser Desain untuk Balok SRPMK

- b. Tulangan geser sepanjang daerah sendi plastis ($2h$) harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan nilai $V_c = 0$, apabila kedua syarat berikut terpenuhi:

- 1) Gaya geser akibat beban gempa (V_e) mewakili setidaknya 50% kekuatan geser perlu maksimum dalam bentang tersebut.
- 2) Gaya tekan aksial terfaktor (P_u) pada elemen balok termasuk pengaruh gempa harus kurang dari $A_g \cdot f'_c / 20$.

2.6.3 Perencanaan Pelat

Pelat beton bertulang yaitu struktur tipis yang dibuat dari beton bertulang dengan bidang yang arahnya horizontal, dan beban yang bekerja tegak lurus pada bidang struktur tersebut. Ketebalan bidang pelat ini relatif sangat kecil apabila dibandingkan dengan bentang panjang/lebar bidangnya (Ali Asroni, 2010)

Pelat Beton ialah suatu struktur yang direncanakan untuk menyediakan suatu permukaan horizontal yang rata pada lantai sebuah bangunan. Pelat beton juga berfungsi untuk menerima beban hidup lantai. Pelat lantai dapat ditumpu oleh struktur balok, kolom (*suspended slab*) serta terdapat pula pelat yang terletak langsung di atas tanah (*slab on ground*).

2.6.3.1 Preliminary Design Pelat

Pelat lantai terbagi menjadi dua bagian yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah.

$$\frac{l_p}{b_p} > 2 \text{ (termasuk pelat satu arah)} \quad (2.109)$$

$$\frac{l_p}{b_p} \leq 2 \text{ (termasuk pelat dua arah)} \quad (2.110)$$

Keterangan:

l_p, b_p = bentang bersih terpanjang dan bentang bersih terpendek

Kemudian tebal minimum pelat satu arah (*one way slab*) sesuai pada SNI 2847-2019, Tabel 7.3.1.1. Adapun detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.22.

Tabel 2.22 Ketebalan Minimum Pelat Satu Arah

Kondisi Tumpuan	Ketebalan Minimum (h)
Tumpuan sederhana	1/20
Satu ujung menerus	1/24

Kondisi Tumpuan	Ketebalan Minimum (h)
Kedua ujung menerus	1/28
Kantilever	1/10

Sedangkan tebal minimum pelat dua arah (*two way slab*) yang mempunyai balok di semua sisinya sesuai dengan SNI 2847-2019, Tabel 8.3.1.2. Adapun detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.23.

Tabel 2.23 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah dengan Balok di Semua Sisinya

α_{fm}	Ketebalan Minimum (h)	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	SNI-2847-2019, Pasal 8.3.1.1	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{I_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$
		125
$\alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{I_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta}$
		90

2.6.3.2 Penulangan Pelat

Terdapat pelat dua arah dan pelat satu arah, adapun perilaku pelat menyerupai konsep balok. Analisis momen terfaktor (M_u) dan geser terfaktor (V_u) diambil dari analisis pada *software* ETABS. Luas minimum tulangan lentur ($A_{s,min}$) pelat harus disediakan sesuai dengan Tabel 2.24. Luasan total penampang dihitung dengan persamaan (2.111).

Tabel 2.24 Minimum Tulangan Lentur ($A_{s,min}$) Pelat Satu Arah

Tipe Tulangan	f_y (MPa)	$A_{s,min}$
Batang ulir	< 420	$0,002A_g$
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	$\frac{0,0018.420}{f_y} A_g$
		$0,0014A_g$

$$A_g = b \cdot h \quad (2.111)$$

Keterangan:

b = lebar pelat per satuan meter (b = 1000 mm)

h = tebal pelat (mm)

Jarak maksimum berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 7.7.2.3, untuk tulangan harus kurang dari $3h$ dan 450 mm. Kemudian tulangan susut, berdasarkan SNI 2847-2019 luasan minimum tulangan susut dan lentur sama. Hal yang menjadi pembeda yaitu pada tulangan susut penyajiannya dalam bentuk rasio tulangan, sedangkan pada tulangan lentur dalam bentuk luasan. Spasi tulangan susut dan suhu berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 24.4.3.3, tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $5h$ dan 450 mm.

2.6.3.3 Kontrol Lendutan Pelat

1. Lendutan Seketika

Lendutan seketika terjadi apabila segera setelah beban bekerja seketika itu pula terjadi lendutan. Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 24.2.3.5, momen inersia efektif (I_e) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.112).

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_e + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} < I_g \quad (2.112)$$

$$f_{cr} = 0,62\sqrt{f'c} \quad (2.113)$$

$$M_{cr} = \frac{f_{cr}I_g}{y} \quad (2.114)$$

Keterangan:

M_{cr} = momen pada saat timbul retak yang pertama kali (SNI 2847-2019, Pasal 24.2.3.5)

M_a = momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung (output *software* ETABS)

f_{cr} = tegangan retak beton (SNI 2847-2019, Pasal 24.5.2.1)

y = tebal pelat (t_p) / 2 (jarak dari garis netral penampang utuh)

$I_g = 1/12.b.t_p^3$ (momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang)

$I_{cr} = 0,25I_g$ (momen inersia penampang retak berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 6.6.3.1.1)

Apabila $M_{cr}/M_a > 1$ maka pelat tidak retak, sehingga digunakan $M_{cr} = M_u$ dan $I_{cr} = I_g$. Kemudian apabila $M_{cr}/M_a \leq 1$ maka pelat retak, sehingga nilai I_e harus dihitung. Menurut (Dipohusodo, 1993), lendutan seketika untuk pelat menerus

dapat dihitung dengan persamaan (2.115). Apabila momen tumpuan kiri dan kanan sama, maka digunakan persamaan (2.116).

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0,1(M_a + M_b)] \quad (2.115)$$

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m + 0,2M_{\text{tumpuan}}] \quad (2.116)$$

Keterangan:

δ_i = lendutan seketika di tengah bentang

L = panjang pelat

E_c = Modulus elastisitas beton

I_g = $(I_{e,\text{lap}} + I_{e,\text{tump}})/2$ (momen inersia rata-rata)

M_a, M_b = momen lentur negatif di tumpuan

M_m = momen di lapangan (tengah bentang)

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 24.2.2, batasan lendutan seketika pelat lantai akibat beban hidup (LL) adalah $L/360$.

2. Lendutan Jangka Panjang

Lendutan jangka panjang (Δ_{LT}) timbul secara berangsur-angsur dalam jangka waktu lama yang disebabkan oleh rangkai dan susut beton. Nilai Δ_{LT} dinyatakan dalam perkalian suatu faktor (λ_{Δ}) dengan lendutan seketika yang disebabkan oleh beban tetap, seperti pada persamaan (2.117).

$$\Delta_{LT} = (\delta_{i,DL+SIDL})\lambda_{\Delta} + \delta_{i,LL} \quad (2.117)$$

Nilai λ_{Δ} dihitung berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 24.2.4.1.1, seperti pada persamaan (2.118).

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1+50\rho} \quad (2.118)$$

Keterangan:

ξ = Faktor ketergantungan waktu untuk beban tetap (SNI 2847-2019, Pasal 24.2.4.1.3)

$\rho = A_s/bd$ (rasio tulangan)

Berdasarkan SNI 2847-2019, Pasal 24.2.2, batasan lendutan jangka panjang pelat lantai akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup adalah $L/240$.