

2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Bangunan Tahan Gempa

Dalam perencanaan bangunan tahan gempa ini diharapkan struktur dapat berespon dengan baik terhadap beban gempa yang bekerja pada struktur tersebut sehingga dapat menjamin bangunan tersebut tidak rusak karena gempa gempa kecil, sedang dan tidak runtuh akibat gempa yang besar.

2.1.1 Sistem Struktur Rangka Pemikul Momen

Berdasarkan SNI 2847:2019, sistem struktur penahan beban lateral, aksial dan momen yang di akibatkan oleh gempa dapat di pikul oleh suatu sistem yaitu sistem rangka pemikul momen. Sistem ini adalah sistem rangka dimana komponen-komponen struktur dan join-joinnya menahan gaya-gaya yang bekerja (Patrisko Hirel Karisoh, Servie O. Dupas 2018).

2.1.1.1 Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa

Pada dasarnya, sistem ini memiliki tingkat daktilitas terbatas dan hanya dapat digunakan di wilayah dengan resiko gempa yang rendah. Keuntungan dari sistem ini adalah arsitekturnya yang sederhana dan murah, sedangkan kerugian dari sistem ini adalah strukturnya sangat rentan terhadap perubahan alam yang dapat mempengaruhi kondisi tanah saat ini. (Patrisko Hirel Karisoh, Servie O. Dupas 2018). Persyaratan sistem rangka pemikul momen biasa diatur pada SNI 2847:2019 pasal 18.3. Untuk pemilihan sistem ini berdasarkan kategori desain seismik (KDS) B.

2.1.1.2 Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah

Sistem rangka pemikul momen menengah memiliki tingkat daktilitas sedang dan digunakan pada daerah dengan tingkat resiko gempa sedang, SRPMM diharapkan dapat menahan gaya-gaya yang ada lebih khususnya untuk kolom agar dapat menahan geser(Patrisko Hirel Karisoh, Servie O. Dupas 2018). Persyaratan sistem rangka pemikul momen menengah diatur pada SNI 2847:2019 pasal 18.4. Untuk pemilihan sistem ini berdasarkan kategori desain seismic (KDS) C.

2.1.1.3 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus

Sistem rangka pemikul momen khusus diharapkan memiliki tingkat daktilitas yang tinggi, yaitu mampu menerima mengalami siklus respon inelastis pada saat menerima beban gempa rencana. Pendetailan dalam ketentuan SRPMK adalah untuk memastikan bahwa respon inelastis dari struktur bersifat daktil (Liando, Dapas, dan Wallah 2020). Bangunan gedung dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) direncanakan dengan konsep *Strong Column and Weak Beam* (kolom kuat dan balok lemah) (Basyir et al. 2022).

Pada saat struktur mengalami gaya lateral gempa, distribusi kerusakan sepanjang ketinggian bangunan bergantung pada distribusi *lateral story drift* (simpangan antar lantai). Jika struktur memiliki kolom yang lemah, simpangan antar lantai akan cenderung terpusat pada satu lantai. Sebaliknya jika kolom sangat kuat, maka *drift* akan tersebar merata, dan keruntuhan lokal di satu lantai dapat diminimalkan (Patrisko Hirel Karisoh, Servie O. Dupas 2018).

Sistem ini digunakan pada daerah dengan tingkat resiko gempa tinggi. Persyaratan sistem rangka pemikul momen khusus diatur pada SNI 2847:2019 pasal 18.2.3 – pasal 18.2.6 dan pasal 18.6 – pasal 18.8. Untuk pemilihan sistem ini berdasarkan kategori desain seismik (KDS) D, E dan F.

2.1.2 Sistem Struktur Dinding

Sistem Struktur ini mempunyai ciri khas penggunaan elemen dinding sebagai struktur utama dalam memikul beban gravitasi dan gempa. Bangunan tinggi tahan gempa umumnya menggunakan elemen-elemen struktur kaku berupa dinding geser untuk menahan kombinasi gaya geser, momen dan gaya aksial yang timbul akibat beban gempa (Batu, Dapas, dan Wallah 2016).

Dinding geser didefinisikan sebagai komponen struktur yang relatif sangat kaku. Fungsi dinding geser berubah menjadi dinding penahan beban jika dinding geser menerima beban tegak lurus dinding geser. Bangunan beton bertulang yang tinggi sering didesain dengan dinding geser untuk menahan gempa. Dinding geser yang didesain dengan baik dapat dipastikan akan meminimalkan kerusakan bagian

non struktural bangunan seperti jendela, pintu, langit-langit dan seterusnya (McCormac 2003).

Berdasarkan letak dan fungsinya, dinding geser dapat diklasifikasikan dalam 3 jenis yaitu:

- *Bearing walls* adalah dinding geser yang juga mendukung sebagian besar beban gravitasi. Tembok-tembok ini juga menggunakan dinding partisi antara apartemen yang berdekatan.
- *Frame walls* adalah dinding geser yang menahan beban lateral, dimana beban gravitasi berasal dari frame beton bertulang. Tembok-tembok ini dibangun diantara baris kolom.
- *Core walls* adalah dinding geser yang terletak di dalam wilayah inti pusat dalam gedung, yang biasanya diisi tangga atau poros lift. Dinding yang terletak di kawasan inti pusat memiliki fungsi ganda dan dianggap menjadi pilihan ekonomis.

Berdasarkan SNI 2847:2019 terdapat sistem dinding struktural khusus (SDSK), yang digunakan pada struktur dengan KDS D, E atau F. Sistem ini harus memenuhi pasal 18.10. Selain SDSK, terdapat juga dinding struktural umum untuk struktur dengan KDS A, B atau C, secara prinsip desain tidak terdapat perhitungan yang berbeda dari struktural khusus.

2.1.3 Sistem Rangka *Bracing*

Struktur rangka *bracing* adalah sistem struktur yang dirancang untuk menahan beban gempa lateral. Elemen *bracing* hanya menerima gaya tekan atau tarik karena bertindak seperti rangka batang. Dengan menggunakan *bracing*, kemungkinan terjadi retak pada sambungan antara balok dan kolom yang menyebabkan kegagalan struktur dapat dihindari. Ini karena *bracing* meningkatkan kapasitas gaya geser lantai dasar struktur dan mengurangi besarnya simpangan horisontal.

Element Pengaku Portal adalah elemen struktur yang diletakan secara menyilang (pada struktur portal, yang berfungsi untuk menopang/mengaku portal dalam menahan beban lateral. Berbeda dengan portal yang tidak menggunakan

pengaku, dimana kekuatan dan kekakuan portal hanya tergantung pada elemen balok dan kolom saja (Nelwan, Wallah, dan Dapas 2018). Penggunaan *bracing* menambah kekakuan suatu portal secara efisien, karena pemasangan secara diagonal menyebabkan batang *bracing* hanya akan menahan gaya aksial saat melayani gaya geser horizontal.

2.2 Sistem Kontrol Pada Bangunan

Sistem kontrol pada bangunan adalah suatu sistem yang mereduksi respons struktur guna meningkatkan kenyamanan pada sebuah bangunan.

2.2.1 Sistem Kontrol Pasif

Suatu struktur yang menerapkan sistem kontrol pasif tidak memerlukan tambahan energi luar untuk mereduksi respons struktur. Sistem kontrol pasif memanfaatkan energi potensial suatu struktur untuk menjalankan fungsinya. Beberapa contoh sistem kontrol pasif adalah *tuned mass damper*, *tuned liquid damper*, *friction damper*, *metallic yield device*, *viscoelastic damper*, dan *fluid viscous damper*.

2.2.2 Sistem Kontrol Semi-Aktif

Tahap berikutnya dalam pengembangan sistem kontrol pada struktur adalah sistem kontrol semi-aktif. Pengembangan ini berfokus pada peningkatan kemampuan dan adaptasi sistem kontrol. Sistem ini terdiri dari sensor, komputer kontrol, aktuator, dan perangkat peredam pasif. Sensor berperan dalam mendeteksi respons struktur terhadap beban yang bekerja. Kemudian, komputer kontrol mengolah informasi dari sensor dan mengubahnya menjadi sinyal kontrol yang dikirimkan ke aktuator. Aktuator ini berfungsi untuk mengatur kinerja perangkat peredam pasif, sehingga sistem dapat beradaptasi dengan kondisi beban yang terjadi. Beberapa sistem kontrol semi-aktif yang telah ditemukan adalah *semiactive tuned mass damper*, *semiactive tuned liquid damper*, *semiactive friction damper*, *semiactive vibration absorber*, *semiactive stiffness control device*, *electrorheological damper*, *magnetorheological damper*, dan *semiactive viscous fluid damper*.

2.2.3 Sistem Kontrol Aktif

Sistem kontrol aktif merupakan perkembangan lebih lanjut dari sistem kontrol semi-aktif dengan kemampuan kontrol dan adaptasi yang lebih baik. Perkembangan ini terjadi karena fungsi aktuator tidak lagi terbatas pada pengaturan perangkat peredam pasif, namun dapat menghasilkan gaya kontrol yang melawan beban gempa dengan mengumpan balik data respon struktur, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kontrol aktif tidak hanya bergantung pada energi potensial yang dimiliki oleh sebuah struktur untuk menjalankan fungsinya. Dalam pengaplikasian, sistem kontrol aktif memiliki beberapa kekurangan yaitu pemasangan yang rumit, membutuhkan energi luar yang cukup besar, dan memerlukan biaya yang tinggi. Contoh dari sistem kontrol aktif adalah *active mass damper*, *active tendon system*, *active brace system*, dan *pulse generation system*.

2.3 Komponen Sistem Dinamik Struktur

Dalam persamaan differensial sebuah gerakan massa pada struktur derajat kebebasan melibatkan tiga properti utama dalam suatu struktur yaitu massa, kekakuan, dan redaman. Ketiga properti struktur ini umumnya disebut dinamik karakteristik struktur. Properti tersebut sangat spesifik yang tidak semuanya digunakan pada problema statik. Kekakuan elemen/struktur adalah satu-satunya karakteristik yang dipakai pada problem statik. Sedangkan karakteristik yang lain yaitu massa dan redaman tidak dipakai

2.3.1 Massa

Pendekatan pertama adalah sistem diskretisasi massa yaitu massa dianggap terpusat pada titik-titik tertentu. Apabila prinsip bangunan geser dipakai maka setiap massa hanya akan bergerak secara horizontal. Karena percepatan hanya terjadi pada struktur yang mempunyai massa maka matriks massa merupakan matriks diagonal. Jadi, jumlah titik massa akan ditunjukkan berdasarkan jumlah lantai/tingkat suatu struktur (Supit et al. 2013).

2.3.2 Kekakuan

Pada prinsip bangunan geser, balok pada lantai dianggap tetap horizontal baik sebelum maupun sesudah terjadi goyangan. Adanya plat lantai yang menyatu secara kaku dengan balok diharapkan dapat membantu kekakuan balok sehingga

anggapan tersebut tidak terlalu kasar. Kekakuan memiliki formulasi yang berbanding lurus dengan modulus elastisitas material struktur dan momen inersia luasan (Supit et al. 2013).

2.3.3 Redaman

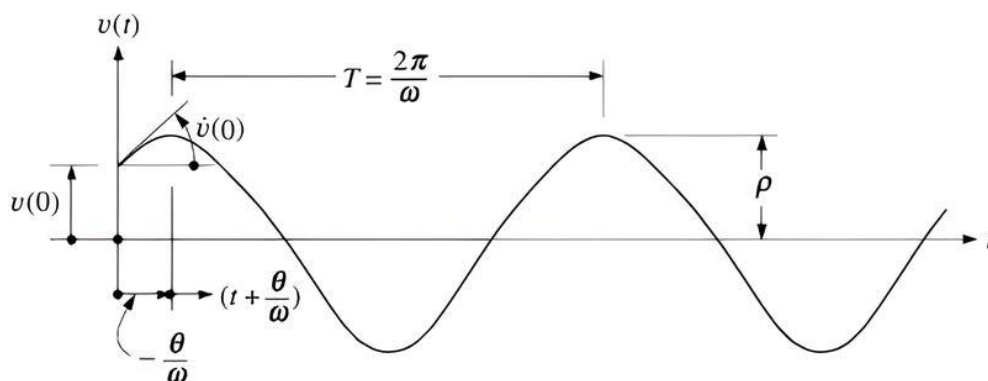
Redaman merupakan peristiwa pelepasan energi oleh struktur akibat adanya berbagai macam sebab, diantaranya oleh adanya gerakan antar molekul di dalam material, gesekan alat penyambung maupun sistem dukungan, gesekan dengan udara dan pada respon inelastik pelepasan energi juga terjadi akibat adanya rotasi sendi plastik. Karena redaman berfungsi melepaskan energi maka hal tersebut akan mengurangi respon struktur (Supit et al. 2013).

2.4 Sistem Dinamik Struktur

Sistem dinamik struktur bertingkat dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu struktur teredam dan tidak teredam.

2.4.1 Sistem Struktur Berderajat Kebebasan Tunggal Tak Teredam

Ketika sebuah struktur diganggu dari posisi keseimbangan statiknya, dikatakan bahwa ia memiliki kemampuan untuk bergetar tanpa terpengaruh oleh eksitasi dinamik dari luar. Sebuah sistem struktur yang diidealisasikan tanpa redaman akan berosilasi terus menerus dengan amplitudo konstan dalam frekuensi naturalnya ketika mendapatkan eksitasi, atau beban luar.



Gambar 2. 1 Kurva Getaran pada Struktur Tanpa Redaman
Sumber: (Nasution 2016)

Tanpa adanya redaman struktur ($C = 0$), massa struktur akan bergetar secara kontinyu dalam posisi kesetimbangan yang tetap (Nasution 2016). Persamaan untuk sistem dinamis bebas tanpa redaman tersebut sebagai berikut:

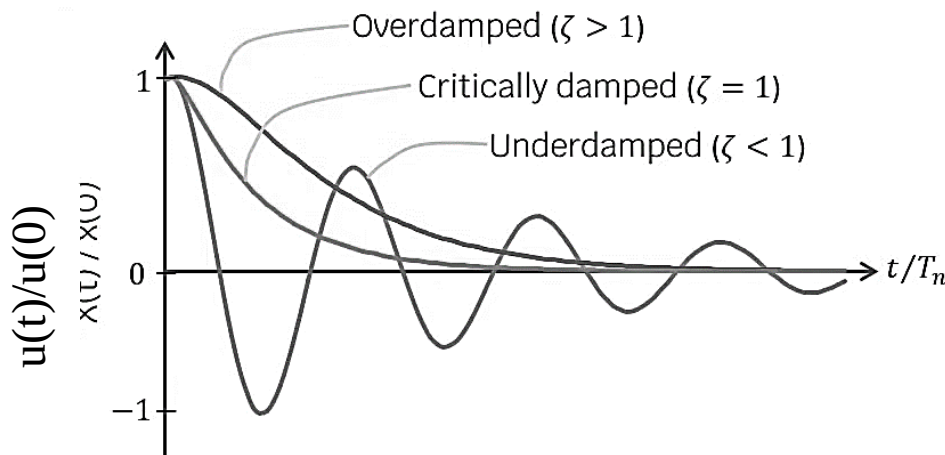
$$m\ddot{u} + ku = P(t) \quad (2.1)$$

Keterangan:

$m\ddot{u}$ = percepatan gerak
 ku = perpindahan gerak
 $P(t)$ = gaya dari luar

2.4.2 Sistem Struktur Berderajat Kebebasan Tunggal Dengan Redaman

Semua struktur pada dasarnya memiliki redaman. Pengalaman telah menunjukkan bahwa memiliki sistem bergerak dalam kondisi ideal tidak mungkin. Sistem yang bergerak selalu mengalami gaya redaman atau friksi. Gaya tersebut akan mendisipasi energi atau pengaruh nya akan mengubah energi pada sistem tersebut (Nasution 2016).



Gambar 2. 2 Kurva Getaran pada Struktur Dengan Redaman
 Sumber: (Nasution 2016)

Persamaan untuk sistem dinamis bebas dengan adanya peredam sebagai berikut:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad (2.2)$$

Keterangan:

$c\dot{u}$ = redaman

2.4.3 Sistem Struktur Berderajat Kebebasan Majemuk Dengan Teredam Fluid Viscous Damper

Dengan adanya peredam berupa *fluid viscous damper*, redaman yang bekerja pada struktur terdiri atas redaman struktur dan redaman tambahan dari FVD (Hajati, Ardita, dan Hanif 2018a). Persamaan gerak untuk sistem *Multi Degree of Freedom* (MDOF) dapat diuraikan sebagai berikut:

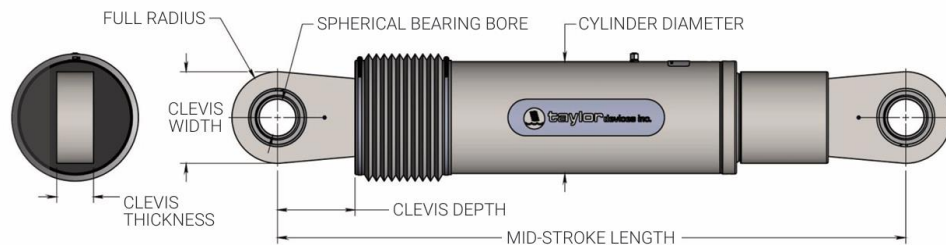
$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U + F_d(t) = -[M]\ddot{x}_g \quad (2.3)$$

Keterangan:

M	=	massa struktur
C	=	koefisien redaman struktur
K	=	kekakuan ekivalen struktur
$F_d(t)$	=	gaya peredam oleh <i>fluid viscous damper</i>
$\ddot{U}$	=	vektor percepatan struktur
$\dot{U}$	=	vektor kecepatan struktur
U	=	percepatan gempa
$\ddot{x}_g$	=	percepatan gempa

2.5 Fluid Viscous Damper

Fluid viscous damper adalah suatu alat yang digunakan untuk meredam sebuah gaya dinamis yang bekerja pada sebuah struktur seperti beban gempa, beban angin, dan beban getaran mesin. FVD berfungsi sebagai peredam tambahan pada struktur dengan mereduksi tegangan dan defleksi saat pembebanan terjadi serta mereduksi gaya saat pembebanan terjadi (Hajati, Ardita, dan Hanif 2018b).



Gambar 2. 3 *Fluid Viscous Damper*
Sumber: (Berquist et al. 2022)



Gambar 2. 4 Pemasangan *Fluid Viscous Damper* pada Bangunan Gedung
Sumber: (Berquist et al. 2022)

Piston dalam silinder FVD bergerak dan mengalirkan cairan melalui lubang di kepala piston. Proses tersebut menghasilkan friksi yang dapat mengubah energi gempa menjadi energi panas. Besaran gaya bergantung pada ukuran dan bentuk dari lubang dan kekentalan cairan dari FVD (Pribadi, Desmaliana, dan Fadlisha 2020).

2.5.1 Kekakuan pada *Fluid Viscous Damper*

Kekakuan pada *fluid viscous damper* merujuk pada kemampuan damper dalam menahan gaya yang bekerja pada struktur. Dalam kasus ini, kekakuan mengacu pada kekakuan dalam pergerakan *piston rod*, yaitu kemampuan *piston rod* untuk menahan dan melawan gaya gesekan yang dihasilkan oleh fluida yang bergerak di dalam *cylinder*.

Kekakuan pada *fluid viscous damper* dapat dinyatakan dalam nilai k yang merupakan koefisien kekakuan. Koefisien kekakuan ini dapat diperoleh dengan melakukan uji tarik pada piston rod damper. Semakin besar nilai k , semakin besar kekakuan pada piston rod dan semakin besar kemampuan damper dalam menahan gaya. Menurut Douglas P. Taylor, kekakuan dari *fluid viscous damper* dapat dilihat dari persamaan

$$K = \frac{AE}{L} \quad (2.4)$$

Keterangan:

K = Kekakuan *fluid viscous damper* (kg/m)

A = Luas selimut *fluid viscous damper* (m²)

E	=	Modulus elastisitas (kg/m^2)
L	=	Panjang <i>fluid viscous damper</i> (m)

2.5.2 Gaya pada *Fluid Viscous Damper*

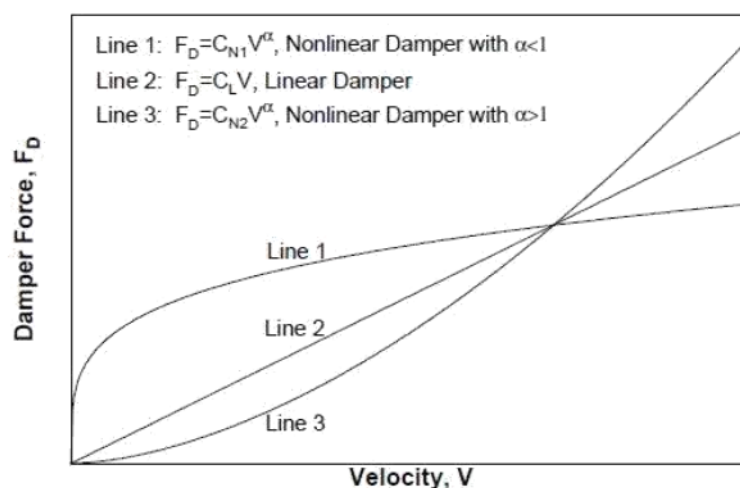
Konsep penambahan damper pada struktur mengasumsikan bahwa energi yang masuk kedalam struktur akan diserap, oleh struktur itu sendiri, melainkan oleh elemen damping tambahan. *Fluid viscous damper* mempunyai kenaikan yaitu bisa sekaligus memperkecil tegangan dan defleksi. Hal ini dikarenakan gaya *fluid viscous damper* bervariasi hanya dengan kecepatan geraknya, yang menghasilkan respon yang berhubungan terhadap tegangan lentur struktur.

Bentuk umum dari gaya redaman yang diinput untuk analisis struktur yang menggunakan *fluid viscous damper* ditulis dengan:

$$F = CV^\alpha \quad (2.5)$$

Keterangan:

F	=	gaya gempa yang dihasilkan FVD (kN)
C	=	koefisien damping
V	=	kecepatan yang dihasilkan FVD (m/s)
α	=	faktor penggunaan linier dan non linier
		$\alpha = 1$, untuk linier
		$\alpha < 1$, untuk non-linier



Gambar 2. 5 Grafik Hubungan Gaya *Damping* dengan Kecepatan
 Sumber: (Berquist et al. 2022)

2.6 Analisis Pembebanan

2.6.1 Jenis-Jenis Beban

Pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan pembebanan berdasarkan SNI 1727:2020 untuk beban mati dan hidup dan SNI 1726:2019 untuk beban gempa.

2.6.1.1 Beban Mati

Menurut SNI 1727:2020, beban mati adalah beban gravitasi akibat struktur itu sendiri. Beban mati diantaranya diakibatkan oleh material pembentuk bangunan.

2.6.1.2 Beban Mati Tambahan

Menurut SNI 1727:2020, beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, finishing, klading Gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya.

2.6.1.3 Beban Hidup

Menurut SNI 1727:2020, beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati.

2.6.1.4 Beban Angin

Menurut SNI 1727:2020 Beban angin adalah beban yang diakibatkan oleh angin yang berada pada sekitar lingkungan bangunan yang dipengaruhi banyak faktor.

Berdasarkan pasal 27.3-1 pada SNI 1727:2020, nilai tekanan angin desain pada bangunan di setiap ketinggian dihitung dengan persamaan berikut ini

$$P = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.6)$$

Keterangan:

P	=	beban angin (N)
q	=	tekanan kecepatan angin (N/m ²)

q_i	=	tekanan berdasarkan ketertutupan gedung (N/m^2)
G	=	faktor efek hembusan angin
C_p	=	koefisien tekanan eksternal
C_{pi}	=	koefisien tekanan internal

Tekanan kecepatan angin atau tekanan velositas, q , dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$q_z = 0,613K_dK_{zt}K_zV^2 \quad (2.7)$$

$$q_h = 0,613K_dK_{zt}K_hV^2 \quad (2.8)$$

Parameter parameter beban angin yang disyaratkan dalam pasal 26 SNI 1727:2020.

2.6.1.4.1 Kecepatan Angin Dasar (V)

Kecepatan angin dasar diatur pada pasal 26.5, dimana V adalah hal yang penting dalam menentukan beban angin. Perhitungan kecepatan angin dasar dapat ditentukan sebagai berikut:

$$V_R = 70 - 56R^{-0,1} \quad (2.9)$$

Keterangan:

V_R	=	kecepatan angin dasar (m/s)
R	=	periode ulang

2.6.1.4.2 Faktor Arah Angin (K_d)

Faktor arah angin oleh SNI 1727:2020 pada pasal 26.6 yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Faktor Arah Angin (SNI 1727:2020 Tabel 26.6.1)

No	Tipe Struktur	Faktor Arah Angin K_d
1	Bangunan Gedung	
	Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
	Komponen dan Klading (K&K)	0,85
2	Atap Lengkung	0,85
3	Kubah Berbentuk Bundar	1,0 ^a

No	Tipe Struktur	Faktor Arah Angin K_d
4	Cerobong, Tangki, dan Struktur Serupa	
	Persegi	0,90
	Segi enam	0,95
	Segi delapan	1,0 ^a
	Bundar	1,0 ^a
5	Dinding Solid Yang Berdiri Bebas, Peralatan Bagian Atap, dan Panel Petunjuk Solid yang Berdiri Bebas Serta Panel Petunjuk Terikat	0,85
6	Panel Petunjuk Terbuka dan Rangka Terbuka Bidang Tunggal	0,85
7	Rangka Batang Menara	
	Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
	Semua penampang lainnya	0,95

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

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

2.6.1.4.3 Kategori Eksposur

Pada SNI 1727:2019 pasal 26.7, 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.

a. Arah dan sektor angin

Untuk setiap arah angin yang dipilih untuk menentukan beban angin, eksposur dari bangunan gedung atau struktur harus ditentukan untuk dua sektor arah melawan angin yang diperluas 45° di setiap sisi arah angin yang dipilih.

b. Kategori kekasaran permukaan

Kekasaran permukaan tanah dalam setiap sektor 45° harus ditentukan untuk suatu jarak lawan angin dari situs sebagaimana ditentukan dalam Pasal 26.7.3

dari kategori yang didefinisikan dalam teks berikut, untuk tujuan menetapkan suatu kategori eksposur seperti yang didefinisikan dalam Pasal 26.7. 3.

Kekasaran Permukaan B: Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.

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

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

c. Kategori eksposur

Eksposur B: Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana Kekasaran Permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.

Eksposur C: Eksposur C berlaku untuk semua kasus di mana Eksposur B atau Eksposur D tidak berlaku.

Eksposur D: Eksposur D berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana 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, dari kondisi Eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

2.6.1.4.4 Faktor Topografi (K_{zt})

Faktor topografi oleh SNI 1727 2020 pada pasal 26.8 yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3) \quad (2.10)$$

Keterangan:

- K_{zt} = faktor topografi
 K_1 = faktor bentuk topografi
 K_2 = faktor reduksi kecepatan angin dan jarak
 K_3 = faktor reduksi kecepatan angin dan elevasi

Jika kondisi situs dan lokasi bangunan gedung dan struktur lain tidak memenuhi semua kondisi yang disyaratkan dalam Pasal 26.8.1, maka $K_{zt} = 1,0$.

2.6.1.4.5 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Faktor elevasi permukaan tanah oleh SNI 1727 2020 pada pasal 26.9 yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (SNI 1727:2020 Tabel 26.9.1)

No	Elevasi tanah di atas permukaan laut (Sea Level) (m)	Faktor elevasi permukaan tanah K_e
1	< 0	Lihat catatan
2	0	1,00
3	305	0,96
4	610	0,93
5	914	0,90
6	1.219	0,86
7	1.524	0,83
8	1.829	0,80
9	>1.829	Lihat catatan

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

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:

$$K_e = e^{-0,0000119z_g}$$

(z_g = elevasi tanah di atas permukaan laut dalam m).

- c. Dalam semua kasus K_e boleh diambil sebesar 1,00

2.6.1.4.6 Faktor Pengaruh Hembusan Angin

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

2.6.1.4.7 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

Koefisien Tekanan internal pada SNI 1727:2019 Pasal 26.13 diatur sebagai berikut:

Tabel 2. 3 Koefisien Tekanan Internal (SNI 1727:2020 Tabel 26.13.1)

No	Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal, GC_{pi}
1	Bangunan tertutup	A_o kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18
2	Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55
3	Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan Klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18
4	Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

2.6.1.4.8 Koefisien Eksposur Tekanan Velositas (K_h dan K_z)

Koefisien eksposur tekanan oleh SNI 1727:2020 Pasal 26.10, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

Tabel 2. 4 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan (SNI 1727:2020 Tabel 26.10.1)

Ketinggian di atas permukaan tanah (m)	Eksposur		
	B	C	D
0 – 4,6	0,57 (0,70) ^a	0,85	1,03
6,1	0,62 (0,70) ^a	0,90	1,08
7,6	0,66 (0,70) ^a	0,94	1,12
9,1	0,70	0,98	1,16
12,2	0,76	1,04	1,12
15,2	0,81	1,09	1,27
18,0	0,85	1,13	1,31
21,3	0,89	1,17	1,34
24,4	0,93	1,21	1,38
27,4	0,96	1,24	1,40
30,5	0,99	1,26	1,43
36,6	1,04	1,31	1,48
42,7	1,09	1,36	1,52
48,8	1,13	1,39	1,55
54,9	1,17	1,43	1,58
61,0	1,20	1,46	1,61
76,2	1,28	1,53	1,68
91,4	1,35	1,59	1,73
106,7	1,41	1,64	1,78
121,9	1,47	1,69	1,82

Ketinggian di atas permukaan tanah (m)	Eksposur		
	B	C	D
137,2	1,52	1,73	1,86
152,4	1,56	1,77	1,89

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

2.6.1.4.9 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal oleh SNI 1727:2020 yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

Tabel 2. 5 Koefisien Tekanan Eksternal (SNI 1727:2020 Gambar 27.3.1)

No	Permukaan	L/B	C_p	Digunakan Dengan
1	Dinding di sisi angin datang	Seluruh Nilai	0,8	q_z
2	Dinding di sisi angin pergi	0-1	-0,5	q_h
		2	-0,3	q_h
		≥ 4	-0,2	q_h
3	Dinding tepi	Seluruh Nilai	-0,7	q_h

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

2.6.1.5 Beban Gempa

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa tersebut. Pada saat bangunan bergetar, timbul gaya-gaya pada struktur bangunan karena adanya kecenderungan massa bangunan untuk mempertahankan dirinya dari gerakan.

Berdasarkan pada peraturan terbaru gempa terbaru SNI 1726:2019, gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur 50 tahun adalah sebesar 2%

Berdasarkan SNI 1726:2019 beban gempa dapat diatur dengan langkah-langkah sebagai berikut.

2.6.1.5.1 Kategori Risiko Bangunan

Kategori risiko bangunan merupakan suatu hal penting dalam mendesain suatu bangunan untuk mengetahui tingkat risiko yang diizinkan pada bangunan yang direncanakan. Kategori risiko bangunan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan fungsi bangunan. Untuk menentukan nilai kategori risiko dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2. 6 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung Untuk Beban Gempa (SNI 1726:2019 Tabel 3)

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, Antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, 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, II, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri	II

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
- Fasilitas manufaktur - Pabrik	
Gedung dan nongedung yang memiliki resiko 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 nongedung, tidak termasuk kedalam kategori resiko 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 nongedung yang tidak termasuk dalam kategori resiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
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.	
Gedung dan nongedung 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 - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang diisyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat	IV

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori resiko IV.	

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

2.6.1.5.2 SDS dan SD1

SDS dan SD1 merupakan suatu hal yang digunakan dalam menentukan parameter percepatan spektral pada saat periode pendek dan 1 detik. SDS dan SD1 yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan SMS dan SM1 yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk menentukan SDS dan SD1 dapat dihitung menggunakan rumus dibawah ini.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.11)$$

$$S_{DI} = \frac{2}{3} S_{MI} \quad (2.12)$$

Keterangan:

S_{DS}	=	parameter respons spektral pada periode pendek
S_{DI}	=	parameter respons spektral pada 1 detik
S_{MS}	=	parameter percepatan spektral pada periode pendek
S_{MI}	=	parameter percepatan spektral pada 1 detik

2.6.1.5.3 Kelas Situs Tanah

Kelas situs tanah merupakan suatu hal yang digunakan dalam memilih tingkatan tanah yang berada pada lingkungan tersebut. Kelas situs tanah yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan parameter tanah. Untuk menentukan kelas situs tanah dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2. 7 Kelas Situs Tanah (SNI 1726:2019 Tabel 5)

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

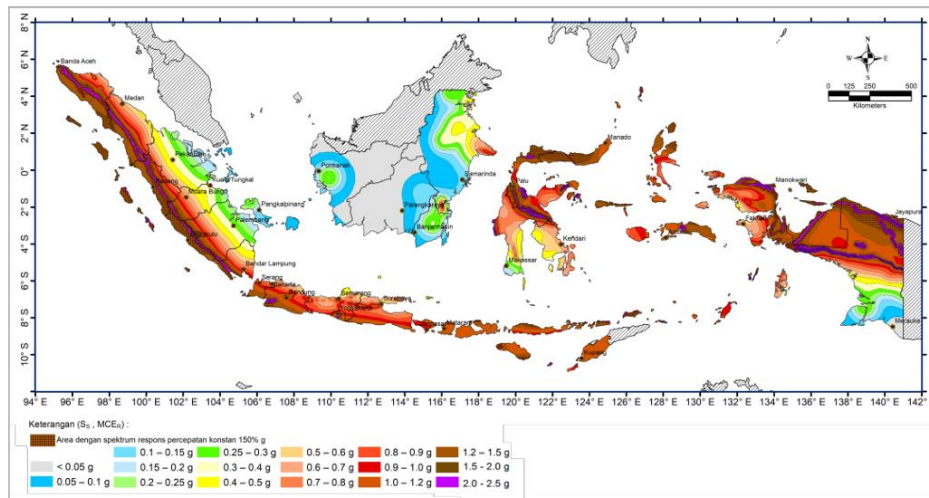
Kelas Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SB (batuan)	7750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	>100
SD (tanah sedang)	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir < 25 kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki saah satu atau lebih dari karakteristik sebagai berikut : - Rawan dan berpontesi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik 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 < 50 kPa		

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2020)

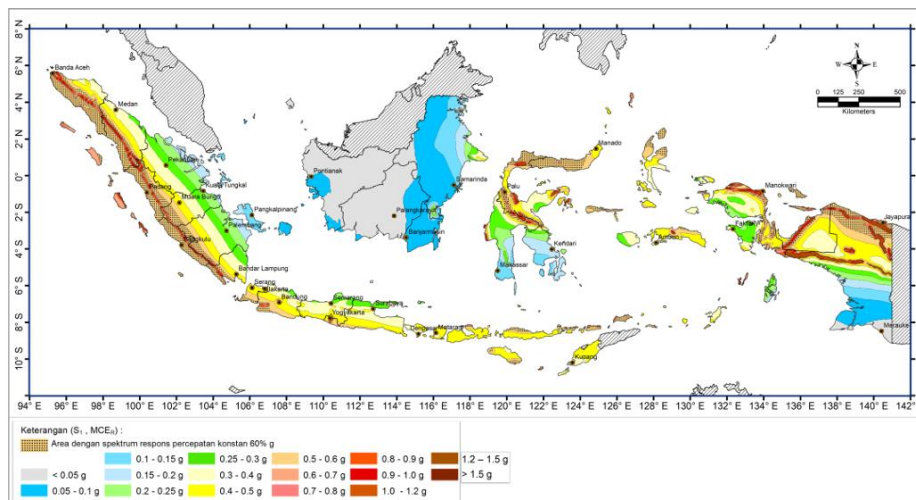
2.6.1.5.4 Nilai S_s dan S_1

S_s dan S_1 merupakan suatu hal yang digunakan dalam menentukan percepatan gempa pada saat 0,2 detik dan 1 detik. S_s dan S_1 yang dijelaskan pada

SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan letak daerah pada peta gempa. Untuk menentukan S_s dan S_1 dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2. 6 Peta Percepatan Saat 0,2 Detik (S_s)
Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)



Gambar 2. 7 Peta Percepatan Gempa Saat 1 Detik (S_1)
Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

2.6.1.5.5 Koefisien Situs F_a dan F_v

Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v) merupakan suatu hal yang digunakan dalam menentukan koefisien situs ada saat periode pendek dan 1 detik. F_a dan F_v yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan S_s dan S_1 yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk menentukan F_a dan F_v dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. 8 Koefisien Situs, F_a (SNI 1726:2019 Tabel 6)

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Resiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode Pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

Catatan :

SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik analisis respon situs-spesifik

Tabel 2. 9 Koefisien Situs, F_v (SNI 1726:2019 Tabel 7)

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Resiko-Tertarget (MCE_R) Terpetakan pada Periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	3=2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

Catatan:

SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik analisis respon situs-spesifik

2.6.1.5.6 Nilai SMS dan SM1

SMS dan SM1 merupakan suatu hal yang digunakan dalam menentukan parameter respons spektral pada saat periode pendek dan 1 detik. SMS dan SM1 yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan S_s dan S_1 yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk menentukan SMS dan SM1 dapat dihitung menggunakan rumus dibawah ini.

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.13)$$

$$S_{MI} = F_v \times S_1 \quad (2.14)$$

Keterangan:

S_{MS}	=	parameter respons spektral pada periode pendek
S_{MI}	=	parameter respons spektral pada 1 detik
F_a	=	koefisien situs pada periode pendek
F_v	=	koefisien situs pada 1 detik
S_s	=	percepatan gempa pada 0,2 detik
S_1	=	percepatan gempa pada 1 detik

2.6.1.5.7 Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik merupakan suatu hal yang digunakan untuk mengetahui tingkat seismik pada suatu bangunan. Kategori desain seismik yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 dibedakan berdasarkan S_{DS} dan SD_1 yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk menentukan kategori desain seismik dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. 10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan S_{DS} (SNI 1726:2019 Tabel 8)

Nilai S_{DS}	Kategori Resiko	
	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. 11 Kategori Desain Seismik Berdasarkan S_{D1} (SNI 1726:2019 Tabel 9)

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

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

2.6.1.5.8 Spektrum Respons Desain

Spektrum respons desain adalah grafik yang digunakan untuk menentukan hubungan percepatan gempa dan waktu. Spektrum respons desain mempunyai perhitungan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019. Perhitungan nilai Spektrum respons desain dapat dijelaskan sebagai berikut.

Untuk $T < T_0$

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.15)$$

Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$

$$S_a = S_{DS} \quad (2.16)$$

Untuk $T_s < T < T_L$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.17)$$

Untuk $T > T_L$

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.18)$$

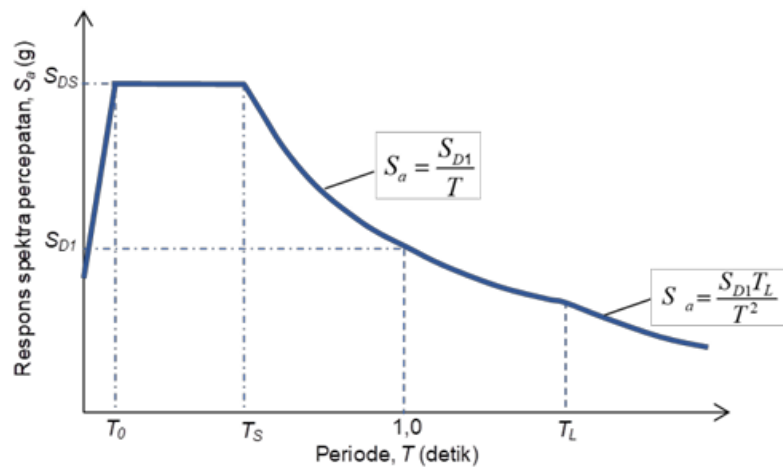
Dengan,

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{DS}}{S_{D1}} \quad (2.19)$$

$$T_s = \frac{S_{DS}}{S_{D1}} \quad (2.20)$$

Keterangan:

T	=	periode waktu gempa (detik)
T_0	=	periode waktu gempa pada periode pendek (detik)
T_s	=	periode waktu gempa pada 1 detik (detik)
T_L	=	periode waktu gempa pada periode panjang (detik) sesuai gambar 20 SNI 1726:2019
S_a	=	percepatan tanah sesuai periode waktu yang ditentukan
S_{DS}	=	parameter respons spektral pada periode pendek
S_{D1}	=	parameter respons spektral pada 1 detik



Gambar 2. 8 Grafik Spektrum Desain (SNI 1726:2019 Gambar 3)
Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

2.6.1.5.9 Sistem Bangunan

Sistem bangunan merupakan suatu hal yang digunakan untuk menentukan cara kerja bangunan itu sendiri. Sistem bangunan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019 kategori desain seismik yang sudah ditentukan sebelumnya. Untuk menentukan sistem bangunan dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. 12 Sistem Bangunan Gaya Seismik (SNI 1726:2019 Tabel 12)

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
C.Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5 ½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4 ½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3 ½	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4 ½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2 ½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4 ½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5 ½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2 ½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3 ½	3 ^o	3 ½	10	10	10	10	10

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

2.6.1.5.10 Koefisien Respons Gempa

Koefisien respons gempa adalah koefisien yang digunakan untuk menentukan gaya geser dasar gempa. Koefisien respons mempunyai perhitungan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019. Perhitungan nilai koefisien respons gempa dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.21)$$

Keterangan:

C_s	=	Koefisien respons gempa
S_{DS}	=	Parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek
I_e	=	Faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai Tabel 4 SNI 1726:2019
R	=	Koefisien reduksi gempa yang ditentukan sesuai Tabel 12 SNI 1726:2019

Nilai C_s yang dihitung tidak perlu melebihi nilai C_s maksimum, yaitu sebagai berikut.

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.22)$$

Untuk $T \geq T_L$

$$C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.23)$$

Nilai C_s yang dihitung tidak kurang dari nilai C_s minimum, yaitu sebagai berikut.

$$C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.24)$$

Keterangan:

S_{D1}	=	Parameter percepatan spektral desain untuk perioda 1,0 detik
T	=	Periode fundamental struktur

2.6.1.5.11 Periode Fundamental

Periode fundamental struktur tidak boleh melebihi hasil perkalian koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dan periode fundamental pendekatan (T_a) yang ditentukan sesuai:

1. Periode Fundamental Pendekatan (T_a)

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.25)$$

Keterangan:

h_n = ketinggian struktur

C_t dan x = koefisien, sesuai pada tabel

Tabel 2. 13 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

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

Batas atas periode fundamental seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya dapat dihitung dengan mengalikan C_u dan T_a ,

Tabel 2. 14 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respons spectral desain pada 1 detik, $SD1$	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

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019b)

2.6.1.5.12 Gaya Geser Dasar Gempa

Gaya geser dasar gempa adalah gaya total akibat gempa bumi yang bekerja pada dasar struktur. Gaya geser dasar gempa mempunyai perhitungan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019. Perhitungan nilai Gaya geser dasar gempa dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$V = C_s W \quad (2.26)$$

Keterangan:

V	=	gaya geser dasar gempa (kN)
C_s	=	koefisien respons gempa
W	=	berat total struktur (kN)

2.6.1.5.13 Distribusi Gaya Geser Dasar Gempa

Distribusi gaya geser dasar gempa adalah distribusi yang digunakan untuk membagi gaya geser dasar gempa per lantai. Distribusi gaya geser dasar gempa mempunyai perhitungan yang dijelaskan pada SNI 1726:2019. Perhitungan nilai Distribusi gaya geser dasar gempa dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.27)$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_x h_x^k} \quad (2.28)$$

Keterangan:

C_{vx}	=	faktor distribusi vertikal
V	=	geser di dasar struktur (kN)
w_i dan w_x	=	bagian berat seismik efektif total struktur yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
h_i dan h_x	=	tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
k	=	eksponen yang terkait dengan periode struktur dengan nilai sebagai berikut: untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $= 1$ untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, $= 2$ untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $= 2$ atau

ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

2.6.2 Kombinasi Pembebanan

Analisa pembebanan dihitung mengacu pada standar SNI 1727:2020 untuk kombinasi pembebanan. Kombinasi pembebanan berpengaruh dalam perhitungan gaya dalam elemen struktur.

2.6.2.1 Kombinasi Beban Metode Ultimit

Pada SNI 1727:2020 pasal 2.3, untuk kombinasi beban dasar metode ultimit dapat digunakan kombinasi-kombinasi berikut:

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

Apabila kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik, maka dapat digunakan kombinasi-kombinasi berikut:

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

2.6.2.2 Kombinasi Beban Tegangan Izin

Pada SNI 1727:2020 pasal 2.4, untuk kombinasi beban dasar metode tegangan izin dapat digunakan dengan kombinasi-kombinasi berikut:

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

Apabila kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik, maka dapat digunakan kombinasi-kombinasi berikut:

8. $D + 0,7E_v + 0,7E_h$
9. $D + 0,525E_v + 0,525E_h + 0,75L$
10. $0,6D - 0,7E_v + 0,7E_h$

2.7 Perencanaan Elemen Struktur

2.7.1 Balok

Balok merupakan salah satu elemen struktur dalam sebuah portal bangunan yang memiliki orientasi horizontal, sedangkan portal sendiri merupakan kerangka utama dari struktur bangunan, terutama bangunan gedung (Imran dan Zulkifli 2014). Balok merupakan elemen struktural yang berperan dalam menahan gaya-gaya yang bekerja dalam arah melintang terhadap sumbunya. Gaya-gaya tersebut menghasilkan momen luar yang menyebabkan balok melengkung ke bawah atau mengalami lendutan. Dalam kondisi lendutan, balok didukung oleh gaya-gaya dalam yang terdiri dari tegangan tekan dan tegangan tarik yang bekerja secara bersamaan. perencanaan kolom.

2.7.1.1 Preliminary Design Balok

Tinggi minimum balok (h) dapat ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.3.1. Kemudian untuk lebar minimum dari balok sesuai Pasal 18.6.2 yaitu minimum lebar balok (b_w) harus sekurang nilai terkecil $0,3h$ dan 250 mm.

Tabel 2. 15 Tinggi Minimum Balok

Kondisi Perletakan	Tebal Minimum (h)
Perlekatan Sederhana	$l/16$
Menerus Satu Sisi	$l/18,5$
Menerus Dua Sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

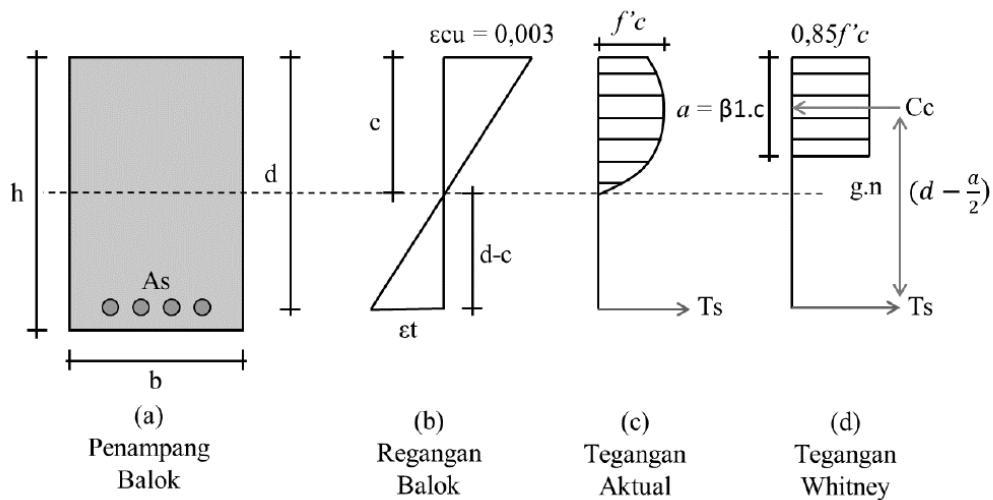
Catatan:

Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal dan tulangan tulangan Mutu 420 MPa. Untuk kondisi lain, nilai di atas harus dimodifikasi sebagai berikut:

- Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis, W_c , di antara 1440 sampai 1840 kg/m³, nilai tadi harus dikalikan dengan $(1,65 - 0,0003W_c)$ tetapi tidak kurang dari 1,09.
- Untuk f_y selain 420 MPa, nilainya harus dikalikan dengan $(0,4 + f_y/700)$.

2.7.1.2 Momen Lentur Balok

2.7.1.2.1 Tulangan Tunggal



Gambar 2. 9 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Tunggal
Sumber: (Imran dan Zulkifli 2014)

Berdasarkan gambar, nilai regangan tulangan tarik dan regangan leleh tulangan tarik dapat dihitung dengan persamaan:

$$\epsilon_t = \left(\frac{d - c}{c} \right) \epsilon_{cu} \quad (2.29)$$

$$\epsilon_y = \frac{F_y}{E_s} \quad (2.30)$$

Parameter ϵ_t bisa juga diganti dengan c/d , untuk nilai parameter c/d dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{c}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_t} \quad (2.31)$$

Dimana nilai jarak tulangan tarik terluar dari penampang balok (d) dapat dihitung dengan persamaan:

$$d = h - \text{selimut beton} - \frac{\text{diameter tulangan}}{2} \quad (2.32)$$

Untuk nilai selimut beton didapat dari SNI 2847:2019 tabel 20.6.1.3.1, yaitu:

Tabel 2. 16 Selimut Beton

Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut (mm)
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Semua	Batang D19 hingga D57	50
		Batang D16, Kawat Ø13 atau D13 dan yang lebih keci	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengeang	40

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Untuk nilai garis netral (a) dapat dihitung menggunakan persamaan:

Untuk keadaan tunggal,

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \quad (2.33)$$

Untuk keadaan umum,

$$a = \beta_1 c \quad (2.34)$$

Keterangan:

a = garis netral (mm)

F_y	=	kekuatan tarik baja (MPa)
E_s	=	modulus elastisitas baja
f'_c	=	kekuatan tekan beton (MPa)
b	=	lebar penampang (mm)
ϵ_{cu}	=	regangan maksimum serat tekan penampang beton (0,003)
ϵ_t	=	regangan tulangan tarik
ϵ_y	=	regangan leleh tulangan tarik

Nilai faktor reduksi tersebut diatur dalam SNI 2847:2019 yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. 17 Faktor Reduksi Kekuatan (SNI 2847:2019 Tabel 21.2.1)

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
1	Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65 – 0,90 sesuai 21.2.2	Di dekat ujung komponen pratarik (pretension) dimana strand belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan 21.2.3
2	Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa terdapat pada 21.2.4
3	Torsi	0,75	-
4	Tumpu (bearing)	0,65	-
5	Zona angkur pascatarik (post-tension)	0,85	-
6	Bracket dan korbel	0,75	-
7	Strut, ties, zona nodal, dan daerah tumpuan yang dirancang dengan strut and-tie di Pasal 23	0,75	-
8	Komponen sambungan beton pracetak terkontrol leleh oleh elemen baja dalam tarik	0,90	-

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
9	Beton polos	0,60	-
10	Angkur dalam elemen beton	0,45 – 0,75 sesuai Pasal 17	-

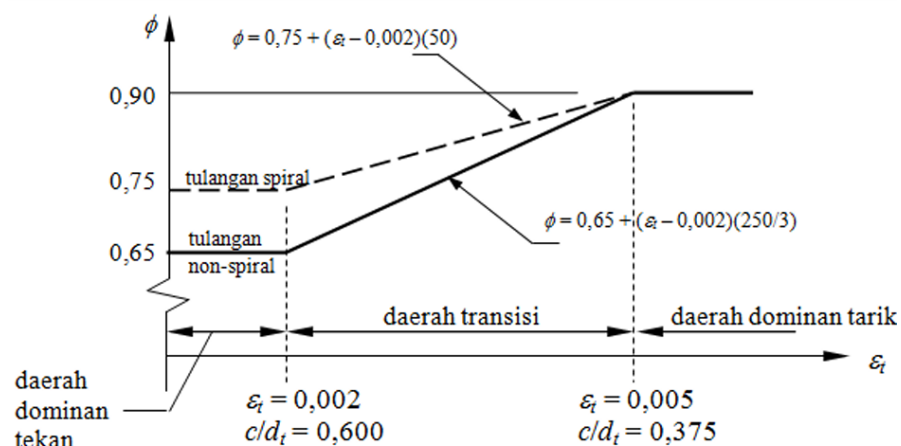
Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Untuk nilai faktor reduksi kekuatan untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial sebagai berikut:

Tabel 2. 18 Faktor Reduksi Kekuatan Untuk Momen, Gaya Aksial, atau Kombinasi Momen dan Gaya Aksial (SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2)

Regangan tarik netto (ε_t)	Klasifikasi	ϕ			
		Jenis tulangan			
		Spiral sesuai 25.7.3		Tulangan lainnya	
$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0,75	a)	0,65	b)
$\varepsilon_{ty} < \varepsilon_t < 0,005$	Transisi	$0,75 + 0,15 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})}$	c)	$0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})}$	d)
$\varepsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,90	e)	0,90	f)

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)



Gambar 2. 10 Penyederhanaan Variasi Nilai Faktor Reduksi Whitney
Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Untuk faktor distribusi tegangan beton (β_1) diatur pada SNI 2847:2019 yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. 19 Faktor Distribusi Tegangan Beton (SNI 2847:2019 Tabel 22.2.2.4.3)

$f'c$	β_1
$17 \leq f'c \leq 28$	0,85
$28 < f'c < 55$	$0,85 - 0,05 \times \left(\frac{f'c - 28}{7} \right)$
$f'c \geq 55$	0,65

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Gaya tekan dari beton (Cc)

$$C_c = 0,85 \times f'c \times a \times b \quad (2.35)$$

Gaya tarik dari tulangan (Ts)

$$T_s = A_s f_y \quad (2.36)$$

Momen Nominal (Mn)

$$\phi M_n = \phi C_c \times \left(d - \frac{a}{2} \right) = \phi T_s \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.37)$$

Rasio tulangan untuk keadaan balance (ρ_b):

$$\rho_b = \left(\frac{0,85 \beta_1 f'c}{F_y} \right) \left(\frac{600}{600 + F_y} \right) \quad (2.38)$$

Rasio tulangan untuk keadaan yang diperlukan (ρ):

$$\rho = \left(\frac{0,85 f'c}{F_y} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2 R_n}{0,85 f'c} \right)} \right) \quad (2.39)$$

Rasio tulangan untuk keadaan maksimum (ρ_{maks}):

$$\rho_{maks} = 0,75 \rho_b \quad (2.40)$$

Rasio tulangan untuk keadaan minimum (ρ_{min}):

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{F_y} \text{ atau } \frac{\sqrt{f'c}}{4 F_y} \quad (2.41)$$

Rasio tulangan untuk keadaan perbesaran ($\rho_{perbesaran}$):

$$\rho_{perbesaran} = 1,3 \times \rho \quad (2.42)$$

Faktor tahanan momen (Rn):

$$R_{nmax} = 0,75 \times \rho_b \times F_y \times \left(1 - \left(\frac{0,375 \rho_b F_y}{0,85 f_c'} \right) \right) \quad (2.43)$$

$$R_n = \frac{M_n}{b d^2} \quad (2.44)$$

Untuk Luas tulangan dapat dihitung dengan persamaan:

Untuk keadaan yang diperlukan:

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho \times b \times d \quad (2.45)$$

Untuk satu tulangan:

$$A_{s \text{ 1 tulangan}} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \quad (2.46)$$

Nilai dari banyaknya (n) tulangan terpasang pada penampang:

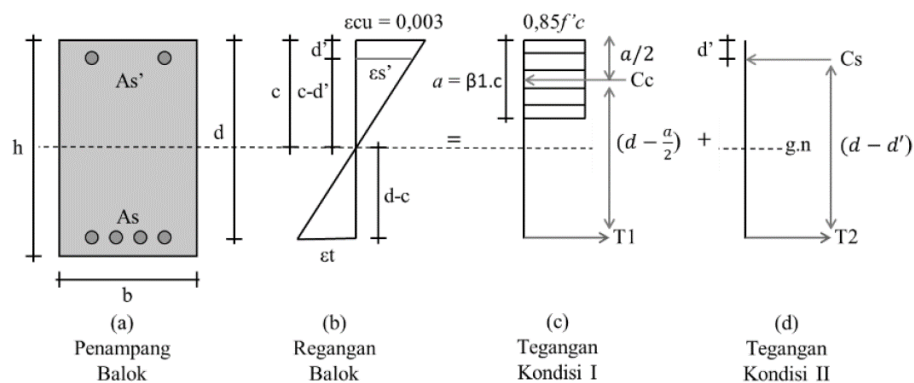
$$n = \frac{A_{s \text{ perlu}}}{A_{s \text{ 1 tulangan}}} \quad (2.47)$$

Luas tulangan yang digunakan:

$$A_s = n \times \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \quad (2.48)$$

2.7.1.2.2 Tulangan Rangkap

Dalam analisis balok bertulangan rangkap dibagi menjadi balok yang terdiri atas tulangan tekan dan tulangan tarik dengan jumlah secukupnya sehingga $T_1 = C_s$, dan juga balok yang terdiri atas daerah tekan beton dan sisa tulangan tarik.



Gambar 2. 11 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap
Sumber: (Imran dan Zulkifli 2014)

Pada gambar di atas dapat dibuktikan bahwa:

$$\varepsilon_s' = \left(\frac{c - d'}{c} \right) 0,003 \quad (2.49)$$

$$f_s' = E_s \times \varepsilon_s' = 600 \times \left(\frac{c - d'}{c} \right) \quad (2.50)$$

Jika $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$, maka $f_s' = f_y$. Substitusi $c = \frac{a}{\beta_1}$ pada persamaan di atas, sehingga:

$$\varepsilon_s' = \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) 0,003 \quad (2.51)$$

Dengan mengambil $\varepsilon_s' = \varepsilon_y$ dan $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{200000}$, maka nilai $\left(\frac{d'}{a} \right)$ batas dimana tulangan tekan akan leleh yaitu:

$$\left(\frac{d'}{a} \right)_{\lim} = \frac{1}{\beta_1} \left(1 - \frac{f_y}{600} \right) \quad (2.52)$$

Jika nilai $\left(\frac{d'}{a} \right) > \left(\frac{d'}{a} \right)_{\lim}$, maka tulangan tekan tidak leleh

Jika nilai $\left(\frac{d'}{a} \right) \leq \left(\frac{d'}{a} \right)_{\lim}$, maka tulangan tekan leleh

Jika tulangan tekan leleh, perhitungan analisis kapasitas momen penampang akan lebih mudah dengan jika tulangan tekan tidak leleh (Imran dan Hendrik 2016).

Untuk Kondisi Tulangan Tekan Leleh,

- Untuk balok I:

Luas tulangan tarik yang dibutuhkan pada balok I dihitung berdasarkan kondisi keseimbangan $C_s = T_1$, sehingga:

$$A_s' f_y = A_{s1} f_y, \text{ atau } A_{s1} = A_s' \quad (2.53)$$

Kapasitas momen balok I dapat dihitung sebagai berikut:

$$M_{n1} = A_s' f_y (d - d') \quad (2.54)$$

- Untuk balok II:

Luas tulangan sisa:

$$A_{s2} = A_s - A_{s1} \quad (2.55)$$

Jika tulangan tarik leleh maka:

$$T_2 = (A_s - A_{s1}) f_y = (A_s - A'_s) f_y \quad (2.56)$$

Gaya tekan dari beton:

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times a \times b \quad (2.57)$$

Berdasarkan keseimbangan gaya $C_c = T_2$, maka:

$$a = \frac{(A_s - A'_s) \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \quad (2.58)$$

Kapasitas momen nominal untuk balok II yaitu:

$$M_{n2} = T_2 \left(d - \frac{a}{2} \right) = (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.59)$$

Sehingga momen nominal total penampang

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.60)$$

$$M_n = A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.61)$$

Untuk kondisi tulangan tekan tidak leleh

Jika tulangan tarik diasumsikan leleh, gaya dalam pada balok yaitu:

$$T_s = A_s f_y \quad (2.62)$$

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

$$C_s = (E_s \times \epsilon'_s) A'_s \quad (2.64)$$

Dimana:

$$\epsilon'_s = \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) 0,003 \quad (2.65)$$

Persamaan keseimbangan gaya aksial pada penampang:

$$C_c + C_s = T \quad (2.66)$$

Atau

$$0,85 f'_c a b + E_s A'_s \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) 0,003 = A_s f_y \quad (2.67)$$

Persamaan ini menghasilkan persamaan kuadratik dalam a yaitu:

$$(0,85f_c'b)a^2 + (0,003EsA_s' - A_s f_y)a - (0,003EsA_s'\beta_1 d') = 0 \quad (2.68)$$

Dari persamaan tersebut nilai variable a dapat ditentukan, sehingga kapasitas momen penampang dapat dihitung, yaitu:

$$M_n = Cc \left(d - \frac{a}{2} \right) + Cs(d - d') \quad (2.69)$$

Rasio tulangan tarik maksimum untuk balok dengan tulangan tekan diatur pada SNI 2847:2019 sebagai berikut:

- Untuk $f_s' = f_y$

$$\rho_{maks} = 0,75(\rho - \rho')_b \quad (2.70)$$

Dimana:

$$(\rho - \rho')_b = \frac{0,85\beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.71)$$

- Untuk $f_s' < f_y$

$$\rho_{maks} = 0,75 \left(\rho - \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right)_b \quad (2.72)$$

$$\left(\rho - \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right)_b = \frac{0,85\beta_1 f_c'}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.73)$$

2.7.1.3 Kekuatan Geser Balok

Berdasarkan SNI 2847:2019, persamaan dasar untuk mendesain balok beton bertulang terhadap geser yaitu:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.74)$$

Keterangan:

V_n	=	kuat geser nominal
V_u	=	gaya geser terfaktor
ϕ	=	faktor reduksi geser = 0,75

Perhitungan kuat geser nominal (V_n) merupakan pejumlahan kuat geser beton (V_c) dan geser tulangan (V_s), sehingga:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.75)$$

Balok beton bertulang memiliki kemampuan menahan geser lentur, namun dibatasi oleh kekuatan betonnya. Apabila kemampuan beton menahan geser lentur (V_c) dilampaui maka akan terjadi kerusakan geser. Nilai kuat geser beton dihitung sesuai SNI 2847:2019 pasal 22.5.5.1. kemudian diambil nilai terkecil. Adapun detail persamaannya yaitu

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (2.76)$$

$$V_c = (0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w) b_w d \quad (2.77)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.78)$$

Sebagai simplifikasi terhadap persamaan di atas, SNI 2847:2019 mengizinkan penggunaan persamaan berikut untuk persamaan kapasitas geser, yaitu:

$$V_c = \frac{1}{6}\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.79)$$

Keterangan:

λ	=	faktor modifikasi ($\lambda = 1$ untuk beton berat normal)
ρ_w	=	rasio tulangan tarik non-prategang
V_u	=	gaya geser terfaktor pada penampang
M_u	=	momen terfaktor pada penampang

Namun bila pada elemen struktur itu ada gaya aksial tekan atau tarik maka SNI 2847:2019 pasal 22.5.6.1 menyebutkan adanya koefisien pengali yang harus diikutkan sebesar:

$$f = \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \quad (2.80)$$

Sehingga nilai kuat geser beton (V_c) menjadi:

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.81)$$

Keterangan:

N_u = beban aksial terfaktor yang terjadi bersamaan dengan V_u
(bernilai positif untuk tekan dan negatif untuk tarik)

A_g = luas bruto penampang

Atau yang lebih detail berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.5.6.1 sebagai berikut:

$$V_c = \left[0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.82)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.83)$$

Dimana,

$$M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8} > 0 \quad (2.84)$$

Karena keruntuhan geser pada balok tanpa tulangan geser biasanya bersifat tiba tiba dan getas, maka SNI mensyaratkan adanya tulangan geser minimum pada balok yang dikenai gaya geser V_u/ϕ yang besarnya melebihi $(0,5V_c)$, kecuali pada:

- Elemen plat/ fondasi telapak.
- Balok dengan ketinggian tidak lebih dari:
 - 250 mm, atau
 - 2,5 x tebal sayap, atau
 - 0,5 x tebal badan.

Pengecualian ini berlaku pada jenis jenis elemen struktur yang memungkinkan terjadinya redistribusi gaya di sepanjang lebar elemen. Pada elemen elemen struktur tersebut, tulangan geser baru diperlukan jika $\frac{V_u}{\phi} \geq V_c$

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

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.85)$$

Jika Senggang membentuk sudut α terhadap horizontal, maka persamaan:

$$V_s = \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{s} \quad (2.86)$$

Keterangan:

A_v = luas tulangan geser

s = jarak tulangan geser

Rasio luas tulangan geser (A_v) dengan jarak tulangan geser (s) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{f_y d} \quad (2.87)$$

$$A_v = n \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.88)$$

Namun perlu diingat bahwa untuk Perencanaan tahan gempa, tulangan geser minimum harus dipenuhi oleh setiap balok. Dalam merencanakan tulangan geser, pada dasarnya dibagi atas beberapa kondisi yaitu:

- Kondisi 1, $V_u \leq 0,5\phi V_c$

Tidak perlu tulangan sengkang

- Kondisi 2, $0,5\phi V_c \leq V_u \leq \phi \left(V_c + \left(\frac{1}{3} \text{ atau } \frac{75\sqrt{f_c'}}{1200} \right) b_w d \right)$

Tulangan Sengkang minimum, yaitu:

$$s \leq \frac{3A_v f_y}{b_w} \text{ atau } s \leq \frac{1200}{75} \frac{A_v f_y}{\sqrt{f_c'} b_w}$$

$$s \leq 0,5d$$

$$s \leq 600 \text{ mm}$$

- Kondisi 3, $\phi \left(V_c + \left(\frac{1}{3} \text{ atau } \frac{75\sqrt{f_c'}}{1200} \right) b_w d \right) \leq V_u \leq \phi \left(V_c + \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} b_w d \right)$

Jarak tulangan Sengkang, yaitu:

$$s \leq \frac{A_v f_y d}{\left(\frac{V_u}{\phi} - V_c \right)} \text{ atau } s \leq \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{\left(\frac{V_u}{\phi} - V_c \right)}$$

$$s \leq 0,5d$$

$$s \leq 600 \text{ mm}$$

- Kondisi 4, $\phi \left(V_c + \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} b_w d \right) \leq V_u \leq \phi \left(V_c + \frac{2}{3} \sqrt{f_c'} b_w d \right)$

$$s \leq \frac{A_v f_y d}{\left(\frac{V_u}{\phi} - V_c \right)} \text{ atau } s \leq \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{\left(\frac{V_u}{\phi} - V_c \right)}$$

$$s \leq 0,25d$$

$$s \leq 300 \text{ mm}$$

- Kondisi 5, $V_u \geq \phi \left(V_c + \frac{2}{3} \sqrt{f_c'} b_w d \right)$

Luas penampang terlalu kecil, maka dimensi penampang harus diperbesar.

2.7.1.4 Momen Torsi Balok

Berdasarkan pendekatan pada SNI 2847:2019, retak akibat torsi terjadi jika momen torsi mencapai T_{cr} , yaitu:

$$T_{cr} = \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} \left(\frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \right) \quad (2.89)$$

Beban torsi harus diperhitungkan dalam desain jika T_u melebihi , $0,25T_{cr}$, yaitu:

$$T_u \geq \frac{1}{12} \phi \sqrt{f_c'} \left(\frac{A_{cp}^2}{p_{cp}} \right) \quad (2.90)$$

Keterangan:

- A_{cp} = luas penampang keseluruhan
 p_{cp} = keliling penampang keseluruhan
 T_u = nilai torsi terfaktor

Jika kondisi batas tersebut terlewati, maka diperlukan tulangan torsi pada penampang. Dalam kondisi ini, dimensi penampang elemen haruslah memenuhi:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2} \right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f_c'} \right) \quad (2.91)$$

Keterangan:

- A_{oh} = luas daerah dalam tulangan geser (mm^2)
 P_h = keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

Tulangan yang dibutuhkan untuk torsi ditentukan berdasarkan:

$$\phi T_n \geq T_u \quad (2.92)$$

Kebutuhan tulangan sengkang untuk torsi dihitung sebagai berikut:

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2 A_0 f_{yt} \cot \theta} \quad (2.93)$$

Keterangan:

A_t	=	luas tulangan torsi (Sengkang), dihitung sebagai luas satu kaki tulangan sengkang
s	=	spasi antara tulangan sengkang
A_0	=	luas bruto yang dilingkup oleh lintasan alir geser, $A_0 = 0,85A_{oh}$
f_{yt}	=	kuat leleh tulangan sengkang
θ	=	sudut retak torsi, $\theta = 45^\circ$ untuk elemen non prategang

Untuk kombinasi geser dan torsi, tulangan Sengkang yang dibutuhkan yaitu:

$$\text{total} \left(\frac{A_{v+t}}{s} \right) = \frac{A_v}{s} + 2 \frac{A_t}{s} \quad (2.94)$$

Luasan minimum yang harus diambil harus lebih besar dari persamaan:

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,062\sqrt{f_c'} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.95)$$

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{\min}}{s} \geq 0,35 \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.96)$$

Lalu dibutuhkan juga tulangan longitudinal tambahan yang dibutuhkan untuk menahan torsi, yaitu:

$$A_l = \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_{yl}} \right) \cot^2 \theta \quad (2.97)$$

Luasan minimum tulangan harus lebih besar dari persamaan:

$$A_{l \min} = 0,42\sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_{yl}} \right) \quad (2.98)$$

$$A_{l \min} = 0,42\sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0,175b_w}{f_{yt}} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_{yl}} \right) \quad (2.99)$$

Selanjutnya mengenai Batasan spasi tulangan torsi, diatur dalam SNI 2847:2019, yaitu:

$$s \leq \frac{P_h}{8} \leq 300 \text{ mm} \quad (2.100)$$

$$s \leq (bt + d) \quad (2.101)$$

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

2.7.2 Pelat

Pelat merupakan elemen struktur yang memiliki ketebalan relatif kecil dibandingkan dengan lebarnya. Pelat menahan beban gravitasi (beban mati dan beban hidup) melalui aksi lentur yang kemudian diteruskan ke setiap tumpuannya secara menerus, atau jepit penuh, atau semi jepit atau sendi rol. Oleh karena ketebalan pelat relatif kecil jika dibandingkan lebarnya, maka dalam gaya dalam dominan adalah momen lentur sedangkan geser lentur sering tidak ditinjau, kecuali tebal pelat mencapai lebih dari 200 mm.

Dari jumlah tumpuannya, pelat dibagi menjadi dua, yaitu pelat yang ditumpu satu arah (*one way slab*) dan pelat ditumpu dua arah (*two way slab*). Pelat satu arah adalah elemen pelat yang memiliki kecenderungan menransfer beban hanya ke satu arah dan hanya ditumpu di kedua sisinya dengan perbandingan rasio $\frac{l_y}{l_x} \geq 2$. Berbeda dengan pelat satu arah, pada pelat dua arah beban ditransfer ke perletakan pelat dalam dua arah dan ditumpu di keempat sisinya dengan perbandingan rasio $\frac{l_y}{l_x} \leq 2$.

2.7.2.1 Preliminary Tebal Pelat

Ketebalan minimum pelat satu arah diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 7.3.1.1 untuk membatasi agar defleksi yang terjadi lebih kecil daripada defleksi yang diizinkan. Tebal pelat yang lebih tipis daripada tebal minimum yang disyaratkan masih diperbolehkan, tetapi harus dilakukan pengecekan defleksi yang terjadi secara komprehensif.

Tabel 2. 20 Ketebalan Minimum Pelat Satu Arah (SNI 2847:2019 Pasal 7.3.1.1)

Kondisi tumpuan	<i>h</i> minimum
Tumpuan sederhana	$l/20$

Kondisi tumpuan	h minimum
Satu ujung menerus	$l/24$
Kedua ujung menerus	$l/28$
Kantilever	$l/10$

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Untuk pelat dua arah tanpa balok interior yang membentang di antara tumpuan pada semua sisinya, ketebalan pelat diatur pada SNI 2847:2019 pasal 8.3.1.1.

Tabel 2. 21 Tebal Minimum Pelat Dua Arah tanpa Balok Interior (SNI 2847:2019 Pasal 8.3.1.1.)

Kuat leleh, f_y	Tanpa drop panel ¹			Dengan drop panel ²		
	Panel eksterior		Panel interior	Panel eksterior		Panel interior
	Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi ³		Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi ³	
280 MPa	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/40$	$l_n/40$
420 MPa	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
520 MPa	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Catatan:

1. Tebal pelat tanpa drop panel tidak boleh kurang dari 125 mm
2. Tebal pelat dengan drop panel tidak boleh kurang dari 100 mm
3. Nilai α untuk balok tepi tidak boleh kurang dari 0,8

Sedangkan untuk pelat dua arah dengan balok interior dengan balok interior di antara tumpuan pada semua sisinya, diatur berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 8.3.1.2:

1. Untuk $\alpha_{fm} \leq 0,2$
2. Untuk $0,2 \leq \alpha_{fm} \leq 2$

$$h_{\min} = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)} \geq 125 \text{ mm} \quad (2.102)$$

3. Untuk $\alpha_{fm} > 2$

$$h_{\min} = \frac{l_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta} \geq 90 \text{ mm} \quad (2.103)$$

Pada tepi pelat yang tidak menerus, yaitu di pelat bagian luar (ekterior), harus diberi:

- Balok tepi dengan $\alpha_f > 0,8$; atau sebagai alternatif
- Ketebalan minimum pelat tepi berdasarkan persamaan di atas harus dinaikkan sebesar minimal 10%.

Keterangan:

h	=	tebal pelat
l_n	=	panjang bentang bersih terpanjang pelat
α_{fm}	=	nilai rata rata
β	=	rasio bentang bersih terpanjang terhadap bentang bersih terpendek pelat

Rasio kekakuan balok-pelat dihitung α dihitung sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{\frac{E_{cb} l_b}{I}}{\frac{E_{cs} l_s}{I}} = \frac{E_{cb} l_b}{E_{cs} l_s} \quad (2.104)$$

Keterangan:

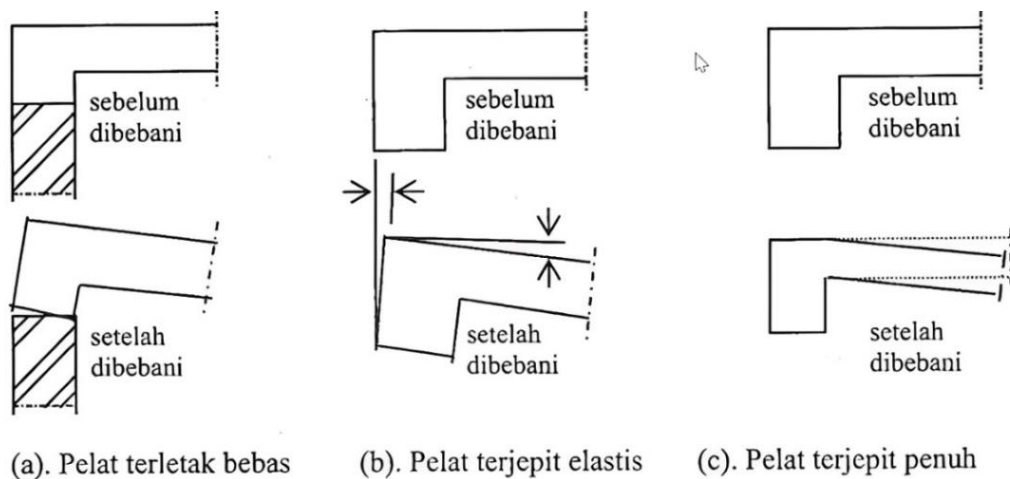
E_{cb}	=	modulus elastisitas balok beton
E_{cs}	=	modulus elastisitas pelat beton
l_b	=	momen inersia balok tak retak
l_s	=	momen inersia pelat tak retak

2.7.2.2 Momen Pada Pelat

2.7.2.2.1 Metode Koefisien Momen

Dalam PBI-71 diberikan tabel koefisien momen lentur yang memungkinkan penentuan nilai momen-momen dari masing-masing arah. Setiap panel pelat dianalisis tersendiri, berdasarkan kondisi tumpuan bagian tepinya.

Jenis perletakan pelat pada balok yaitu pelat terletak bebas, pelat terjepit elastis dan pelat terjepit penuh. Pelat terletak bebas terjadi bila tepi-tepi pelat yang menumpu atau tertanam didalam tembok bata, harus dianggap sebagai tepi yang terletak bebas. Pelat terjepit elastis terjadi bila bagian pelat tersebut menjadi satu kesatuan monolit dengan balok yang relatif tidak kaku dan sesuai dengan kekakuannya memungkinkan pelat tersebut untuk berputar pada tumpuannya. Dan Pelat terjepit penuh terjadi bila penampang pelat diatas tumpuan tersebut tidak dapat berputar akibat pembebanan pada pelat.



Gambar 2. 12 Jenis Perletakan Pelat pada Balok
Sumber: (Priyosulistyo 2022)

2.7.2.2.2 Metode Desain Langsung (*Direct Design Method*)

Metode Desain Langsung menggunakan pendekatan koefisien momen untuk menghitung momen momen positif dan negatif pada pelat. Menurut SNI 2847:2019 pasal 8.10.2, ada batasan batasan yang harus diperhatikan, seperti:

1. Sedikitnya harus terdapat tiga bentang menerus dalam masing-masing arah.

2. Panjang bentang berurutan yang diukur dari pusat ke pusat tumpuan dalam masing-masing arah harus tidak boleh berbeda lebih dari sepertiga bentang terpanjang.
3. Panel berbentuk persegi, dengan rasio dimensi terpanjang terhadap dimensi terpendek yang diukur dari pusat ke pusat tumpuan, tidak melebihi 2.
4. Posisi kolom boleh menyimpang tidak lebih dari 10% dari bentang dari arah pergeseran masing-masing sumbu di antara titik pusat kolom yang berurutan.
5. Semua beban yang diperhitungkan hanya akibat beban gravitasi dan terdistribusi merata di seluruh panel.
6. Beban hidup tak terfaktor tidak boleh melebihi dua kali beban mati tak terfaktor.
7. Untuk panel pelat dengan balok sebagai tumpuan di semua sisinya, kekakuan relatif balok di dua arah yang saling tegak lurus, yaitu:

$$0,2 \leq \frac{\alpha_1 l_2^2}{\alpha_2 l_1^2} \leq 5,0 \quad (2.105)$$

Distribusi elastis dari momen akan berbeda cukup besar dari yang diasumsikan pada metode desain langsung kecuali syarat kekakuan terpenuhi.

2.7.2.2.3 Metode Rangka Ekuivalen untuk Pelat Dua Arah

Pada metode rangka ekuivalen, penentuan momen momen ini dilakukan melalui analisis struktur rangka. Oleh karena itu, metode rangka pada dasarnya dapat diaplikasikan untuk menghitung momen pada sembarang struktur rangka. Sehingga dapat dikatakan bahwa metode ini lebih luas keberlakuannya dibandingkan dengan metode desain langsung.

Pada metode rangka ekuivalen, pelat lantai bangunan dibagi atas rangkaian rangka ekuivalen yang diambil dalam arah longitudinal dan transversal bangunan. Rangka-rangka ekuivalen juga harus dibagi menjadi lajur kolom dan lajur tengah. Rangka ekuivalen ini terdiri atas pelat lantai, balok (jika ada), dan bagian kolom di atas dan bawah pelat.

2.7.2.3 Kekuatan Geser Pelat

2.7.2.3.1 Kekuatan Geser Pelat Satu Arah

Kekuatan geser satu arah nominal dalam penampang dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.106)$$

Nilai V_c diambil nilai terkecil dari persamaan:

$$V_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (2.107)$$

$$V_c = (0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w) b_w d \quad (2.108)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.109)$$

Sebagai simplifikasi terhadap persamaan di atas, SNI 2847:2019 mengizinkan penggunaan persamaan berikut untuk persamaan kapasitas geser, yaitu:

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.110)$$

Keterangan:

λ	=	faktor modifikasi ($\lambda = 1$ untuk beton berat normal)
ρ_w	=	rasio tulangan tarik non-prategang
V_u	=	gaya geser terfaktor pada penampang
M_u	=	momen terfaktor pada penampang

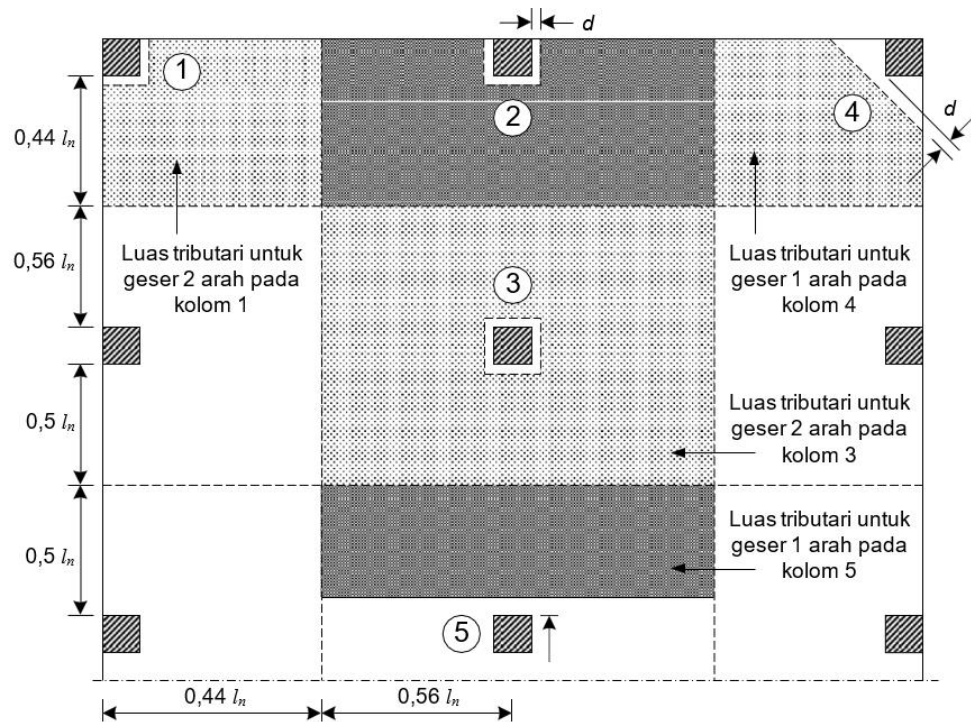
2.7.2.3.2 Kekuatan Geser Pelat Dua Arah

2.7.2.3.2.1 Pelat Tanpa Balok Interior

Tipe keruntuhan geser dalam desain pelat dua arah tanpa balok interior yaitu geser satu arah (geser balok) dan geser dua arah (*punching shear*). Analisis kekuatan geser satu arah pada pelat dua arah dilakukan dengan cara yang sama dengan metode pengecekan geser pada pelat satu arah. Penampang kritis untuk geser satu arah berada pada jarak d dari muka perletakan pelat atau dari muka *drop panel* atau dari muka setiap perubahan ketebalan. Sedangkan Penampang kritis untuk transfer geser dua arah berbeda dengan penampang kritis untuk geser satu

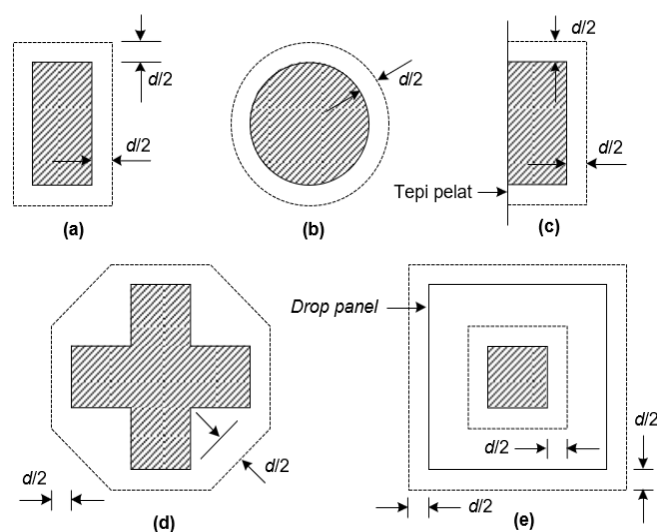
arah. Transfer geser dua arah diasumsikan kritis pada penampang vertikal berjarak $d/2$ sekeliling muka kolom.

Besarnya gaya geser yang ditransfer pada penampang kritis diasumsikan berdasarkan luas tributary beban yang terkait dengan penampang yang ditinjau.



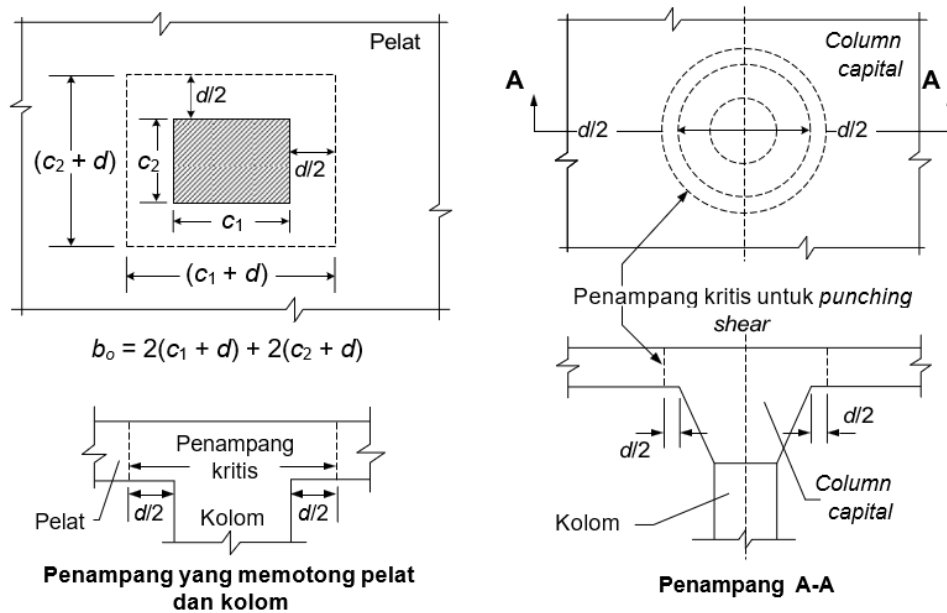
Gambar 2. 13 Luas Tributary Beban untuk Pengecekan Geser pada Pelat Dua Arah tanpa Balok

Sumber: (Imran dan Hendrik 2016)



Gambar 2. 14 Denah Daerah Kritis untuk Transfer Geser Dua Arah pada Pelat Tanpa Balok dengan Berbagai Tipe Kolom

Sumber: (Imran dan Hendrik 2016)



Gambar 2. 15 Penampang Kritis pada Hubungan Pelat-Kolom dan Pelat-Kapital
Sumber: (Imran dan Hendrik 2016)

Desain geser dua arah untuk kondisi tanpa transfer momen adalah sebagai berikut:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.111)$$

Dimana V_u dihitung sesuai luas tributary geser.

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.112)$$

Pada desain pelat, desain tulangan geser biasanya diabaikan, sehingga $V_s = 0$. Sedangkan V_c diambil nilai terkecil dari persamaan:

$$V_c = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3\beta_c} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (2.113)$$

$$V_c = \left(\frac{\alpha_s d}{12 b_o} + \frac{1}{6} \right) \sqrt{f_c'} b_o d \quad (2.114)$$

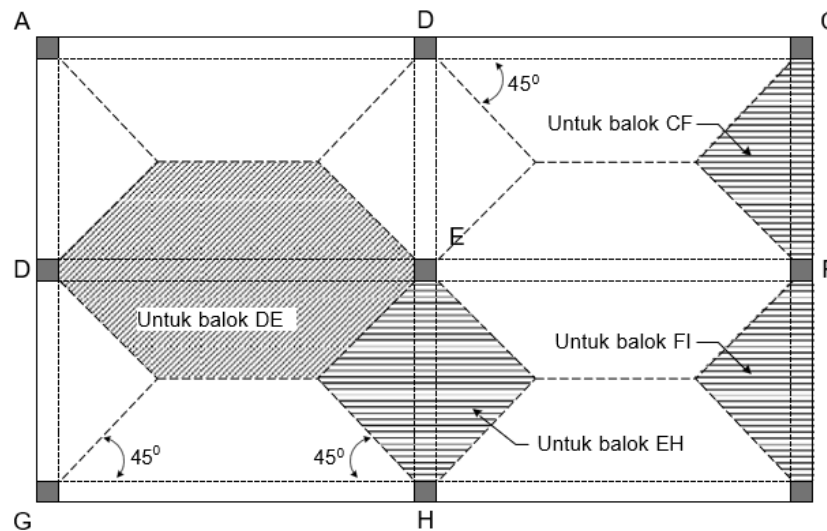
$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f_c'} b_o d \quad (2.115)$$

Keterangan:

- β_c = rasio sisi terpanjang dengan sisi terpendek kolom
- α_s = koefisien yang nilainya 40 untuk kolom interior, 30 untuk kolom tepi, dan 20 untuk kolom sudut.
- b_o = keliling penampang kritis

2.7.2.3.2 Pelat dengan Balok Interior

Pada desain pelat dengan balok interior, jika rasio kekakuan balok pada bentang yang ditinjau ($\alpha_1 l_2 / l_1$), lebih besar atau sama dengan satu maka semua gaya geser akan dipikul balok. Jika balok mempunyai kondisi $\alpha_1 l_2 / l_1 \leq 1$; maka gaya geser yang dipikul adalah ($\alpha_1 l_2 / l_1$) dikalikan dengan gaya geser yang dihitung berdasarkan luas triburi seperti pada gambar. Sisa gaya geser harus ditransfer oleh pelat ke kolom, melalui mekanisme geser dua arah. Sedangkan geser yang dipikul oleh balok pada dasarnya merupakan geser satu arah.



Gambar 2. 16 Luas Tributari Perhitungan Gaya Geser pada Balok
Sumber: (Imran dan Hendrik 2016)

2.7.2.4 Penulangan pada Pelat

2.7.2.4.1 Tulangan Lentur Pelat

Setelah semua momen lentur pada lajur kolom dan lajur tengah ditetapkan, maka baja tulangan dapat dihitung untuk momen positif dan negatif di masing masing lajur sebagai berikut:

$$\phi M_n = \phi T_s \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.116)$$

$$T_s = A_s \times F_y \quad (2.117)$$

Terkait nilai kebutuhan tulangan pada pelat, perhitungan dan konsep sama seperti perhitungan balok.

Detail penulangan lentur pada sistem pelat dua arah tanpa balok dapat dilakukan dengan mengacu pada gambar:

LAJUR	LOKASI	A _s MINIMUM PADA PENAMPANG	TANPA PANEL TURUN	DENGAN PANEL TURUN
LAJUR KOLOM	ATAS	SISA 50%		
	BAWAH	100%		
LAJUR TENGAH	ATAS	100%		
	BAWAH	SISA 50%		

Gambar 2. 17 Panjang Minimum Tulangan Pelat Tanpa Balok
Sumber: (Imran dan Hendrik 2016)

2.7.2.4.2 Tulangan Geser Pelat

Kriteria desain penulangan geser untuk geser dua arah dapat mengacu pada SNI 2847:2019, dimana:

$$V_n = V_c + V_s \leq \frac{1}{2} \sqrt{f_c'} b_o d \quad (2.118)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.119)$$

Keterangan:

- d = tinggi efektif pelat
- f_c' = kekuatan tekan beton
- b_o = keliling penampang kritis
- A_v = luas tulangan geser
- s = jarak tulangan geser

2.7.2.4.3 Tulangan Susut dan Suhu

Tulangan susut dan suhu harus dipasang tegak lurus arah tulangan lentur untuk pelat satu arah. Luasan tulangan susut dan suhu harus menyediakan paling

sedikit memiliki rasio luas tulangan terhadap luas bruto penampang beton sebagai berikut (SNI 2847:2019 Pasal 24.4.3.2):

Tabel 2. 22 Rasio Tulangan Ulir Susut dan Suhu Minimum terhadap Luas Penampang Beton Bruto

Jenis tulangan	f_y (MPa)	Rasio tulangan minimum	
Batang ulir	< 420	0,0020	
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	Terbesar dari:	$\frac{0,0018 \times 420}{f_y}$
			0,0014

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional 2019a)

Spasi tulangan susut dan suhu harus dipasang dengan spasi tidak lebih jauh dari lima kali tebal pelat atau tidak lebih dari 450 mm.

2.7.3 Kolom

2.7.3.1 Preliminary Design Kolom

Kolom akan didesain untuk menahan gaya aksial beban terfaktor pada semua lantai dan atap. Gaya aksial dihitung menggunakan metode perlimpahan beban yang berasal dari pelat dan balok. Luasan penampang akan dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{P}{A_g} \rightarrow \frac{P}{\sigma} = \frac{P_u}{\phi f'_c} \rightarrow A_g = \frac{P_u}{0,3 f'_c} \quad (2.120)$$

Batasan dimensi kolom sesuai pada SNI 2847:2019 pasal 18.7.2.1, yang menyebutkan bahwa penampang kolom tidak boleh kurang dari 300 mm dan rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2.7.3.2 Kekuatan Tekan pada Kolom

2.7.3.2.1 Kekuatan Kolom Pendek yang Dibebani Secara Sentris

Kekuatan kolom pendek yang dibebani secara sentris terdiri atas komponen parameter beton dan sambungan baja, dapat dilihat pada persamaan:

$$P_{oc} = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) \quad (2.121)$$

$$P_{os} = f_y A_{st} \quad (2.122)$$

Sehingga:

$$P_o = 0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (2.123)$$

Keterangan:

A_g = luasan penampang kolom kotor

A_{st} = luas tulangan baja

Untuk menghindari perlunya perhitungan eksentrisitas minimum, SNI 2847:2019 mensyaratkan adanya reduksi kekuatan sedemikian rupa sehingga:

Untuk kolom dengan tulangan spiral:

$$\phi P_{n(max)} = 0,85\phi(0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \quad (2.124)$$

Untuk kolom dengan tulangan sengkang pengikat:

$$\phi P_{n(max)} = 0,80\phi(0,85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}) \quad (2.125)$$

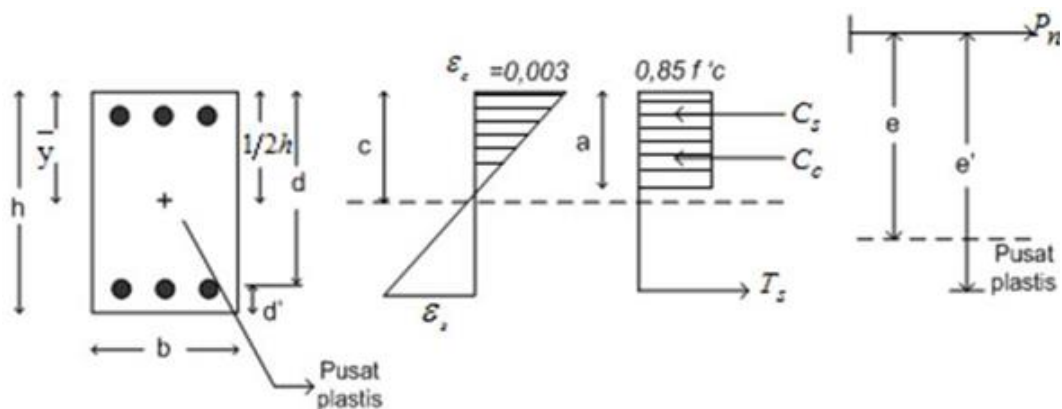
Nilai kuat tekan beton diatas harus dikalikan kembali dengan faktor reduksi untuk elemen struktur tekan, yaitu:

$\phi = 0,75$ untuk kolom dengan tulangan spiral,

$\phi = 0,65$ untuk kolom dengan tulangan Sengkang pengikat.

2.7.3.2.2 Kekuatan Kolom Pendek yang Dibebani Secara Eksentris

Ketika kolom menerima beban tekan eksentris, maka kolom akan menerima pengaruh tekan sekaligus momen. Prinsip tegangan persegi ekuivalen pada analisis balok juga dapat diterapkan pada analisis kolom terhadap beban eksentris. Momen pada kolom digambarkan sebagai perkalian antara beban aksial dengan eksentrisitas.



Gambar 2. 18 Distribusi Tegangan pada Kolom
Sumber: (Imran dan Zulkifli 2014)

Berdasarkan gambar, dapat diturunkan persamaan persamaan sebagai berikut:

Untuk kondisi tekan

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} \quad (2.126)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.127)$$

Untuk kondisi tarik

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} \quad (2.128)$$

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' \leq f_y \quad (2.129)$$

Untuk Gaya dalam:

$$C_c = 0,85f'_c b a \quad (2.130)$$

$$C_s = A_s' f_s' \quad (2.131)$$

$$T_s = A_s f_s \quad (2.132)$$

Persamaan keseimbangan mensyaratkan:

Untuk gaya tahanan aksial:

$$P_n = C_c + C_s - T_s \quad (2.133)$$

$$P_n = 0,85f'_c b a + A_s' f_s' - A_s f_s \quad (2.134)$$

Untuk momen tahanan nominal:

$$M_n = P_n e \quad (2.135)$$

$$M_n = C_c \left(\bar{y} - \frac{d}{2} \right) + C_s (\bar{y} - d') + T_s (d - \bar{y}) \quad (2.136)$$

$$M_n = 0,85f'_c b a \left(\bar{y} - \frac{d}{2} \right) + A_s' f_s' (\bar{y} - d') + A_s f_s (d - \bar{y}) \quad (2.137)$$

Berdasarkan besarnya regangan pada baja tulangan tarik, keruntuhan penampang kolom dapat dibedakan menjadi keruntuhan tarik, keruntuhan balance, dan keruntuhan tekan. Jika P_n adalah beban aksial nominal suatu kolom, dan P_{nb} adalah beban aksial nominal pada kondisi seimbang (*balanced*), maka:

$$P_n < P_{nb}: \text{keruntuhan tarik}$$

$P_n = P_{nb}$: keruntuhan *balance*

$P_n > P_{nb}$: keruntuhan tekan

Untuk keruntuhan tarik pada penampang kolom persegi, terjadi ketika kondisi $e > e_b$ atau $P_n < P_{nb}$, keruntuhan tarik akan terjadi pada tulangan baja sehingga $f_s = f_y$. Sedangkan tegangan baja tekan tidak harus selalu sama dengan f_y . Jika tulangan tekan leleh, maka $f_s' = f_y$.

Untuk kondisi keruntuhan seperti ini dan $A_s = A_s'$, maka:

$$P_n = 0,85f'_c b a \quad (2.138)$$

$$M_n = P_n e = 0,85f'_c b a \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d') \quad (2.139)$$

Dimana $\frac{h}{2} = \bar{y}$, yang merupakan pusat geometri penampang, persamaan persamaan di atas dapat digabung menjadi:

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d') \quad (2.140)$$

Karena $a = \frac{P_n}{0,85f'_c b}$, maka:

$$P_n e = P_n \left(\frac{h}{2} - \frac{P_n}{1,7f'_c b} \right) + A_s f_y (d - d') \quad (2.141)$$

Jika $\rho = \rho' = \frac{A_s}{bd}$, maka:

$$P_n = 0,85f'_c b d \left[\left(\frac{h}{2} - e \right) + \sqrt{\left(\frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{2A_s f_y (d - d')}{0,85f'_c b d}} \right] \quad (2.142)$$

Jika $m = \frac{f_y}{0,85f'_c}$, persamaan di atas dapat ditulis:

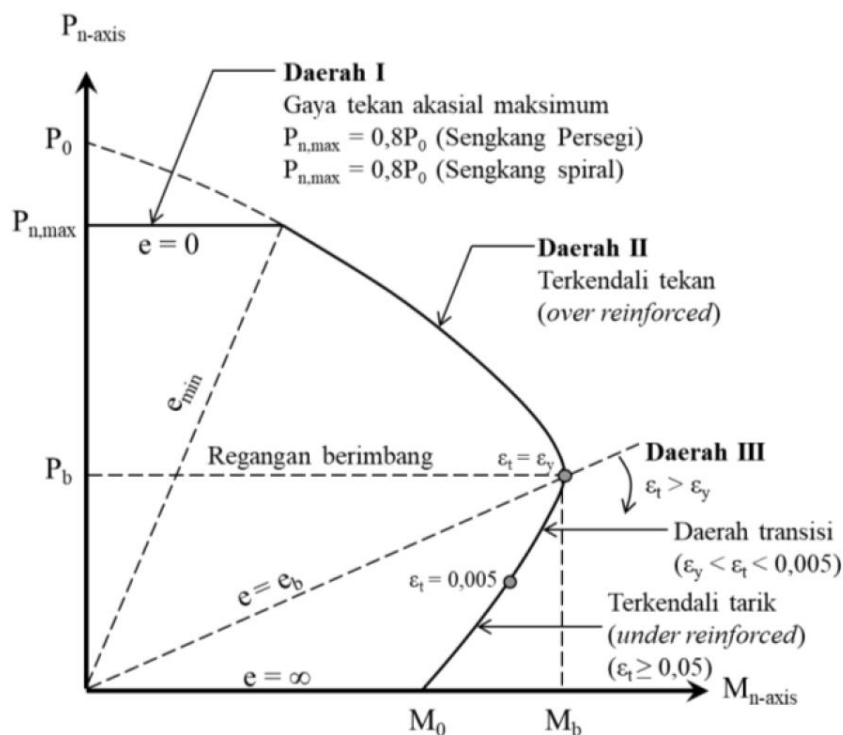
$$P_n = 0,85f'_c b d \left[\frac{h - 2e}{2d} + \sqrt{\left(\frac{h - 2e}{2d} \right)^2 + 2m\rho \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \quad (2.143)$$

Untuk tipe keruntuhan tekan terjadi diawali dengan hancurnya beton sedangkan baja tulangan tarik belum leleh. Eksentrisitas e lebih kecil daripada eksentrisitas pada kondisi seimbang (balanced), $e < e_b$ dan tegangan pada tulangan

tariknya lebih kecil daripada tegangan leleh ($f_s < f_y$). Untuk kolom dengan keruntuhan tekan, dapat digunakan persamaan dari Whitney, yaitu:

$$P_n = \frac{A_s' f_y}{\left(\frac{e}{d-d'}\right) + 0,5} + \frac{b h f_c'}{\left(\frac{3he}{d^2}\right) + 1,18} \quad (2.144)$$

Kapasitas suatu penampang beton bertulang dapat dinyatakan dalam bentuk diagram interaksi P-M, yang menunjukkan hubungan antara beban aksial dan momen lentur pada elemen struktur tekan dalam kondisi batas. Setiap titik pada diagram P-M menunjukkan satu kombinasi P_n dan M_n untuk penampang dengan kondisi sumbu tertentu.



Gambar 2. 19 Diagram Interaksi P-M Elemen Kolom
Sumber: (Imran dan Zulkifli 2014)

2.7.3.3 Kekuatan Geser pada Kolom

Nilai kekuatan geser penampang kolom terhadap geser berlaku persamaan sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.145)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f'_c}b_wd\sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.146)$$

$$V_c = \left[0,16\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.147)$$

Dimana:

$$M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8} \geq 0 \quad (2.148)$$

2.7.4 Fluid Viscous Damper

2.7.4.1 Preliminary Design Fluid Viscous Damper

Untuk menentukan kecepatan alat tersebut dapat dihitung menggunakan kecepatan per lantai pada bangunan dikarenakan kecepatan yang dihasilkan peredam sejalan dengan kecepatan yang dihasilkan per lantai pada bangunan. Perhitungan kecepatan per lantai dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$V = \frac{2\pi\Delta}{T} \quad (2.149)$$

Keterangan:

V	=	kecepatan yang dihasilkan per lantai (m/s)
Δ	=	simpangan yang dihasilkan per lantai (m)
T	=	periode struktur yang dihasilkan bangunan (s)

Untuk menentukan konstanta *damping* tersebut dapat dihitung menggunakan target redaman yang diperlukan. Perhitungan koefisien damping dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$C = \zeta \frac{k_i T}{n_i \pi \cos^2 \theta_j} \quad (2.150)$$

Keterangan:

C	=	koefisien <i>damping</i>
k_i	=	kekakuan per lantai bangunan (kN/m)
n_i	=	jumlah pemasangan FVD per lantai
T	=	periode struktur yang dihasilkan bangunan (s)

- θ = derajat pemasangan FVD terhadap lantai
 ζ = target redaman damper (%)

Target redaman yang diperhitungkan sesuai *Damper Design Manual* FVD jika bangunan tersebut baru ingin dibangun sebesar 20-25%. Redaman tersebut juga dapat diperhitungkan sebagai berikut:

Untuk non linier,

$$\zeta = \frac{\sum W_j}{4\pi \sum W_k} \quad (2.151)$$

Untuk linier

$$\zeta = \frac{T \sum C_j \phi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_k \phi_k^2} \quad (2.152)$$

Keterangan:

- C_j = koefisien damping
 W_j = energi disipasi yang dihasilkan gedung (kN)
 W_k = energi disipasi yang dihasilkan damper (kN)
 m_k = massa per lantai (kN s/m)
 T = periode struktur yang dihasilkan bangunan (s)
 θ = derajat pemasangan FVD terhadap lantai
 ζ = target redaman damper (%)

2.7.4.2 Sambungan Fluid Viscous Damper

Pada perencanaan sambungan *fluid viscous damper* yang terdiri dari baut, plat, dan profil baja sebagai *bracing* diatur oleh SNI 1729:2020 dan dapat dijelaskan sebagai berikut.

2.7.4.2.1 Sambungan Bracing Profil Baja

Pada sambungan baja untuk *Fluid viscous damper* (FVD), hanya menerima tekan dan tarik. Perhitungan komponen baja terhadap tekan dan tarik dapat dijelaskan sebagai berikut:

Nilai kekuatan tarik nominal dari suatu komponen struktur ditentukan berdasarkan dua macam kondisi, yaitu:

Untuk kondisi leleh tarik,

$$P_n = F_y A_g \quad (2.153)$$

Untuk kondisi keruntuhan tarik,

$$P_n = F_u A_e \quad (2.154)$$

Dimana untuk nilai A_e , yaitu:

$$A_e = A_n U \quad (2.155)$$

Keterangan:

P_n	=	gaya aksial tarik nominal (N)
F_y	=	kekuatan tarik baja (MPa)
F_u	=	kekuatan leleh baja (MPa)
A_g	=	luasan kotor (mm ²)
A_e	=	luasan efektif (mm ²)
U	=	faktor lag geser

Nilai kekuatan tekan nominal dari suatu komponen struktur tekan akibat tekan lentur harus ditentukan berdasarkan keadaan batas dari tekuk lentur.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2.156)$$

Nilai tegangan kritis (F_{cr}), yaitu:

Untuk kondisi *inelastic buckling*, jika $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, atau $F_e \geq 0,44F_y$

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (2.157)$$

Untuk kondisi *elastic buckling*, jika $\frac{KL}{r} > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, atau $F_e < 0,44F_y$

$$F_{cr} = 0,877 F_e \quad (2.158)$$

Dimana nilai F_e yaitu:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (2.159)$$

Keterangan:

P_n	=	gaya aksial tekan nominal (N)
F_{cr}	=	kekuatan kritis baja (MPa)
r	=	jari jari girasi (mm)
F_e	=	kekuatan efektif baja (MPa)
E	=	modulus elastisitas baja (MPa)
K	=	faktor panjang efektif
L	=	panjang batang

2.7.4.2.2 Sambungan Baut

Pada sambungan untuk *fluid viscous damper* (FVD) terdapat sambungan baut. Suatu baut yang memikul beban terfaktor (R_u) harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.160)$$

Nilai tahanan nominal baut (R_n) berbeda beda untuk masing masing tipe sambungan, antara lain:

Untuk tahanan geser baut,

$$R_n = m r_1 f_u^b A_b \quad (2.161)$$

Untuk tahanan tarik baut,

$$R_n = 0,75 f_u^b A_b \quad (2.162)$$

Untuk tahanan tumpu baut,

$$R_n = 2,4 d_b t_p f_u \quad (2.163)$$

Untuk lubang baut selot panjang tegak lurus arah gaya

$$R_n = 2,0 d_b t_p f_u \quad (2.164)$$

Keterangan:

r_1	=	0,50 untuk baut tanpa ulir pada bidang geser 0,40 untuk baut dengan ulir pada bidang geser
f_u^b	=	kuat tarik baut (MPa)
A_b	=	luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

m	=	jumlah bidang geser
d_b	=	diameter baut pada daerah tak berulir
t_p	=	tebal pelat
f_u	=	tarik putus terendah dari baut atau pelat

2.7.4.2.3 Sambungan Las

Pada sambungan untuk *fluid viscous damper* terdapat sambungan las. Untuk sambungan las harus memenuhi persamaan:

$$\phi R_{nw} \geq R_u \quad (2.165)$$

Keterangan:

R_{nw}	=	tahanan nominal per satuan panjang las
R_u	=	beban terfaktor per satuan panjang las

Nilai tahanan nominal (R_{nw}) berbeda beda untuk masing masing tipe sambungan, antara lain:

Persamaan nilai tahanan nominal untuk sambungan las tumpul yaitu:

- Bila sambungan dibebani dengan gaya tarik atau gaya tekan aksial terhadap luas efektif, maka :

Untuk bahan dasar,

$$\phi R_{nw} = 0,90 t_e f_y \quad (2.166)$$

Untuk las,

$$\phi R_{nw} = 0,90 t_e f_{yw} \quad (2.167)$$

- Bila sambungan dibebani dengan gaya geser terhadap luas efektif, maka :

Untuk bahan dasar,

$$\phi R_{nw} = 0,90 t_e (0,6 f_y) \quad (2.168)$$

Untuk las,

$$\phi R_{nw} = 0,80 t_e (0,6 f_{uw}) \quad (2.169)$$

Persamaan nilai tahanan nominal untuk sambungan las sudut yaitu:

Untuk sambungan las sudut,

$$\phi R_{nw} = 0,75t_e(0,6f_{uw}) \quad (2.170)$$

Untuk bahan dasar,

$$\phi R_{nw} = 0,75t_e(0,6f_{uw}) \quad (2.171)$$

Persamaan nilai tahanan nominal untuk sambungan las baji dan pasak yaitu

$$\phi R_{nw} = 0,75(0,6f_{uw})A_w \quad (2.172)$$

Keterangan:

t_e	=	tebal efektif
A_w	=	luas geser efektif las
f_{uw}	=	kuat tarik putus logam las

2.7.4.3 Pemeliharaan Fluid Viscous Damper

Pemeliharaan fluid viscous damper pada bangunan gedung merupakan proses penting untuk memastikan kinerja optimal sistem peredam dalam mengurangi respons dinamik struktur terhadap beban seismik. Fluid viscous damper harus dilakukan inspeksi visual rutin secara berkala, minimal setiap 6 bulan sekali. Inspeksi visual dilakukan untuk memeriksa kondisi fisik damper, termasuk kebocoran, korosi, atau kerusakan mekanis. Fluid viscous damper juga harus dilakukan pemeriksaan kinerja setiap 2 tahun sekali atau setelah terjadi gempa bumi yang signifikan. Pengecekan dilakukan untuk memastikan damper berfungsi sesuai desain dan spesifikasi teknis dengan menggunakan alat ukur untuk memeriksa gaya redaman.

Jika terdapat kerusakan pada fluid viscous damper, langkah yang harus dilakukan tergantung pada jenis dan tingkat kerusakannya. Kerusakan ringan, seperti kebocoran kecil atau keausan seal (paking), dapat diperbaiki dengan mengganti komponen yang rusak dan mengisi ulang fluida sesuai spesifikasi produsen. Untuk kerusakan sedang, seperti penurunan kinerja atau kerusakan pada komponen mekanis, langkah perbaikan melibatkan penggantian bagian yang rusak, seperti piston atau rod, serta pengujian ulang untuk memastikan fungsi damper telah pulih. Namun, dalam kasus kerusakan berat, seperti deformasi pada housing atau kegagalan fungsi total, penggantian seluruh unit damper menjadi solusi yang lebih tepat.

2.7.5 Tangga

2.7.5.1 Lebar Injakan dan Tinggi Injakan Anak Tangga

Dalam menentukan dimensi lebar injakan atau *antrade* (a) dan tinggi injakan atau *optrade* (s) harus memperhitungkan ukuran langkah kaki manusia, kenyamanan dan keamanan (Kholiq 2015).

1. Kontrol berdasarkan ukuran langkah kaki manusia

$$2s + a = 60 \text{ s. d. } 65 \text{ cm}$$

2. Kontrol berdasarkan kenyamanan

$$s + a = \pm 46 \text{ cm}$$

3. Kontrol berdasarkan kemanan

$$a - s = \pm 12 \text{ cm}$$

Umumnya nilai *antrade* (a) berkisar antara 22,5 cm sampai 30 cm, kemudian untuk nilai *optrade* (s) berkisar antara 14 cm sampai 20 cm.

2.7.5.2 Jumlah Anak Tangga

Jumlah anak tangga dipengaruhi oleh ketinggian antar lantai, nilai *antrade* (a), *optrade* (s) dan juga tinggi bordes apabila direncanakan terdapat bordes. Sebaiknya anak tangga dibuat seragam ukurannya, baik tinggi ataupun lebarnya. Apabila tidak dimungkinkan, anak tangga yang berbeda ukurannya diletakkan pada bagian paling bawah. Jumlah anak tangga diambil dari pembulatan pada persamaan:

$$n_s = \frac{h}{s} \quad (2.173)$$

$$n_a = n_s - 1 \quad (2.174)$$

Keterangan:

n_s	=	jumlah <i>optrade</i> (s)
n_a	=	jumlah <i>antrade</i> (a)
h	=	ketinggian antar lantai

2.7.5.3 Tebal pelat lantai dan Pelat Bordes

Tebal pelat tangga maupun pelat bordes minimum dapat direncanakan sesuai SNI 2847:2019 pasal 7.3.1.1. atau sesuai dengan tebal pelat minimum. Kemudian dimensi lainnya dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_l = n_t a \quad (2.175)$$

$$L_b = P - P_l \quad (2.176)$$

$$P_m = \sqrt{P_l^2 + h_b^2} \quad (2.177)$$

$$l = P_m + L_b \quad (2.178)$$

Keterangan:

P	=	panjang area rencana untuk tangga
P_l	=	panjang tangga arah horizontal
n_t	=	jumlah anak tangga yang digunakan
L_b	=	lebar bordes
h_b	=	tinggi bordes
P_m	=	panjang pelat miring
l	=	panjang total pelat

2.7.5.4 Kemiringan Tangga

Kemiringan tangga (α) direncanakan tidak terlalu curam supaya memudahkan orang naik tanpa mengeluarkan tenaga yang banyak, dan tidak terlalu landai supaya tidak memakan banyak tempat. Kemiringan tangga yang wajardan biasa digunakan adalah berkisar antara $25^\circ - 42^\circ$ (Kholiq 2015).