

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Bangunan Apartemen

Apartemen adalah jenis bangunan bertingkat yang terdiri dari beberapa unit hunian yang terpisah, biasanya dirancang untuk menyediakan tempat tinggal bagi individu atau keluarga dalam lingkungan perkotaan. Ukuran dan fasilitas apartemen bervariasi, mulai dari studio kecil hingga unit yang lebih besar dengan beberapa kamar tidur. Konsep apartemen muncul sebagai solusi untuk mengatasi kebutuhan hunian di tengah pertumbuhan populasi yang pesat dan keterbatasan lahan.

Apartemen sebagai unit hunian terpisah memiliki akses dan fasilitas sendiri, seperti dapur, kamar mandi, dan ruang tamu, yang memungkinkan penghuni untuk hidup secara mandiri. Apartemen sering dilengkapi dengan fasilitas bersama, seperti kolam renang, *gym*, taman, area parkir, dan lain-lain yang dapat digunakan oleh semua penghuni.

2.2 Peredam Getaran

Getaran yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan pada struktur, mengurangi kenyamanan penghuni, dan mempengaruhi umur pakai bangunan. Oleh karena itu, penggunaan peredam getaran menjadi penting dalam perancangan struktur modern. Peredam getaran adalah perangkat yang pada sebuah bangunan untuk mengurangi amplitudo getaran yang terjadi pada struktur akibat beban dinamis, seperti gempa bumi, angin, atau getaran mekanis. Peredam getaran secara umum dapat dibedakan menjadi dua kategori yaitu:

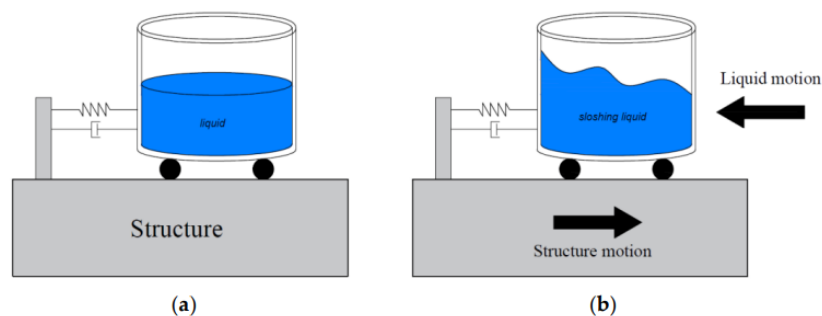
1. Peredam Aktif

Peredam jenis ini menggunakan sumber energi eksternal untuk mengendalikan sensor dan aktuator untuk menghasilkan gaya yang berlawanan dengan getaran yang terjadi. Peredam aktif dapat memberikan respon terhadap getaran dinamis secara *real time* dengan sistem kontrol dan sumber daya yang kontinu. Contoh peredam aktif adalah *Active Mass Damper* (AMD) dan *Elektromagnetic Damper*.

2. Peredam Pasif

Peredam pasif adalah perangkat yang tidak memerlukan sumber energi eksternal untuk beroperasi. Peredam ini bekerja berdasarkan prinsip fisika sederhana dan dirancang untuk menyerap atau mengalihkan energi getaran. Contoh peredam pasif adalah *Tuned Mass Damper* (TMD), *Tuned Liquid Damper* (TLD), *Viscoelastic Damper*, dan *Base Isolator*.

Tuned Liquid Damper (TLD) adalah salah satu jenis peredam pasif yang dirancang khusus untuk mengurangi getaran pada struktur bangunan. TLD menggunakan massa cair yang bergerak dalam tangki untuk menyerap energi getaran. TLD bekerja berdasarkan prinsip resonansi, di mana frekuensi alami dari cairan dalam tangki disesuaikan dengan frekuensi getaran struktur (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Model TLD
(Sumber: Ocak et al., 2022)

Ketika frekuensi getaran struktur mendekati frekuensi alami TLD, cairan dalam tangki mulai bergerak dengan amplitudo yang lebih besar. Ketika struktur bergetar, cairan dalam tangki bergerak ke arah yang berlawanan dengan arah getaran. Gerakan ini menciptakan gaya inersia yang berlawanan, yang membantu mengurangi amplitudo getaran pada struktur.

2.3 Sistem Struktur

Sistem struktur adalah susunan elemen-elemen konstruksi yang dirancang untuk menahan, menyalurkan, dan mendistribusikan beban dengan aman dari

bangunan ke pondasi dan akhirnya ke tanah. Sistem ini memastikan bahwa bangunan memiliki kestabilan, kekuatan, dan ketahanan terhadap berbagai beban, baik beban statis seperti berat sendiri bangunan maupun beban dinamis seperti gempa dan angin. Klasifikasi sistem struktur yang umum digunakan berdasarkan cara elemen-elemen struktural bekerja untuk menahan beban yaitu struktur rangka dan struktur dinding.

2.3.1 Sistem Struktur Rangka (*Frame System*)

Sistem Rangka Pemikul Beban adalah sistem struktur yang terdiri dari susunan elemen-elemen utama seperti balok dan kolom yang saling terhubung untuk menahan dan menyalurkan beban dari bangunan ke pondasi. Sistem ini dirancang untuk menanggung berbagai jenis beban, termasuk beban gravitasi seperti beban mati dan beban hidup, serta beban lateral akibat angin dan gempa. Dalam sistem ini, balok berperan sebagai elemen horizontal yang mendistribusikan beban ke kolom, sementara kolom sebagai elemen vertikal berfungsi meneruskan beban tersebut ke pondasi dan akhirnya ke tanah.

Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) adalah salah satu jenis sistem rangka pemikul beban yang dirancang untuk menahan beban gravitasi dan beban lateral, terutama akibat gempa dan angin. Dalam sistem ini, balok dan kolom dihubungkan dengan sambungan kaku sehingga mampu mentransfer momen lentur tanpa memerlukan elemen tambahan seperti dinding geser atau bracing. Klasifikasi SRPM berdasarkan tingkat daktilitasnya adalah sebagai berikut:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

SRPMK adalah jenis SRPM dengan daktilitas tertinggi yang dirancang untuk menahan gempa besar dengan deformasi signifikan tanpa mengalami kegagalan struktural mendadak. Sistem rangka ini harus memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 Pasal 18.2.3-Pasal 12.2.8 dan Pasal 18.6-Pasal 18.8 dan dikenakan untuk struktur pada KSD D, E, atau F.

2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

SRPMM memiliki tingkat daktilitas yang lebih rendah dibandingkan SRPMK tetapi tetap mampu menahan gaya lateral akibat gempa sedang. Sistem rangka

ini harus memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 Pasal 18.4 dan hanya bisa dikenakan untuk struktur pada KSD C.

3. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

SRPMB memiliki tingkat daktilitas paling rendah dan biasanya diterapkan pada bangunan di daerah dengan risiko gempa kecil hingga sedang. Sistem rangka ini harus memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 Pasal 18.3 dan hanya bisa dikenakan untuk struktur pada KDS B.

2.3.2 Sistem Dinding Pemikul (*Wall System*)

Sistem Dinding Pemikul adalah sistem struktur di mana dinding berfungsi sebagai elemen utama yang menahan dan menyalurkan beban dari bangunan ke pondasi. Dalam sistem ini, dinding tidak hanya berperan sebagai pembatas ruang, tetapi juga sebagai elemen struktural yang menanggung beban gravitasi seperti beban mati dan beban hidup, serta beban lateral akibat gempa dan angin. Dinding yang dipakai berupa beton bertulang (*Shear Wall*) atau susunan batu (*Masonry*).

2.3.3 Sistem Struktur Ganda (*Dual System*)

Sistem struktur ganda adalah sistem struktural yang mengombinasikan dua mekanisme utama untuk menahan beban lateral dan gravitasi. Sistem ini terdiri dari rangka pemikul momen dan sistem dinding geser, yang bekerja secara simultan dalam menahan gaya lateral. Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.2.5.8 kuat geser dinding geser dari sistem interaktif dinding geser-rangka harus sekurang-kurangnya 57% dari geser tingkat desain pada tiap tingkat, sedangkan rangka dari sistem interaktif dinding geser-rangka harus mampu memikul sekurang-kurangnya 25% dari geser tingkat desain pada setiap tingkat.

2.4 Struktur Beton Bertulang

Struktur beton adalah sistem konstruksi yang menggunakan beton sebagai material utama. Beton bertulang (*Reinforced Concrete*) adalah beton struktural yang ditulangi dengan tidak kurang dari jumlah baja prategang atau tulangan nonprategang minimum (Badan Standardisasi Nasional, 2019b). Struktur beton bertulang banyak digunakan dalam berbagai jenis bangunan, mulai dari gedung

bertingkat, jembatan, hingga infrastruktur lainnya, karena kekuatan, daya tahan, dan kemampuannya untuk dibentuk sesuai kebutuhan desain.

Beton memiliki kekuatan tekan yang sangat tinggi, yang membuatnya ideal untuk menahan beban vertikal. Kekuatan tekan beton biasanya diukur dalam satuan megapaskal (MPa) dan dapat bervariasi tergantung pada komposisi dan mutu material. Meskipun beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi, kekuatan tariknya relatif rendah. Beton tidak dapat menahan gaya tarik dengan baik, sehingga sering kali mengalami retak ketika diberi beban tarik. Suatu perkiraan kasar nilai kuat tarik beton normal hanya berkisar antara 9%-15% (Haibaho dkk., t.t.).

Untuk mengatasi kelemahan beton dalam menahan gaya tarik, digunakan baja tulangan (*reinforcement steel*) dalam struktur beton bertulang. Baja tulangan memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi, sehingga dapat menahan gaya tarik yang bekerja pada struktur. Kombinasi antara beton dan baja tulangan menciptakan sistem yang saling melengkapi, di mana beton menahan beban tekan dan baja tulangan menahan beban tarik.

2.4.1 Material Beton

Beton (*Concrete*) adalah campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (admixture) (Haibaho dkk., t.t.). Berat jenis beton normal tipikal adalah 2320 hingga 2400 kg/m³.

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton keras untuk menahan gaya tekan dalam setiap satuan luas permukaan beton (Haibaho dkk., t.t.). Kuat tekan beton ditentukan oleh perbandingan semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan berbagai jenis campuran.

Kuat tarik beton adalah kemampuan beton dalam menahan gaya tarik sebelum mengalami keretakan atau kegagalan. Uji kuat tarik dilakukan dengan memberikan tegangan tarik pada beton secara tidak langsung dimana spesimen direbahkan dan ditekan sehingga terjadi tegangan tarik pada beton.

Modulus elastisitas beton (E_c) adalah parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan beton terhadap deformasi elastis akibat beban yang diberikan. Nilai modulus elastisitas beton tergantung pada kuat tekan beton (F_c'), jenis

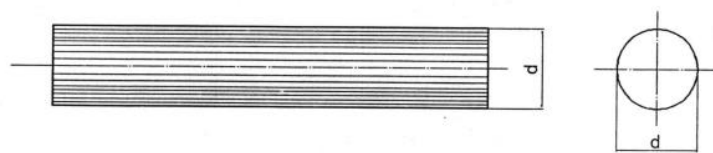
agregat, dan kualitas material yang digunakan. Nilai modulus elastisitas beton normal berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 19.2.2 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2.1)$$

2.4.2 Material Tulangan Baja

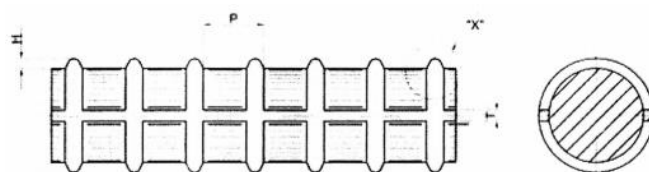
Tulangan baja adalah material utama yang digunakan dalam beton bertulang untuk menahan gaya tarik yang tidak dapat ditahan oleh beton dengan baik. Baja tulangan beton adalah baja karbon atau baja yang berbentuk batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip/ulir dan digunakan untuk penulangan beton (SNI 2052-2017). Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2019b) modulus elastisitas (E_s) untuk batang dan kawat nonprategang diizinkan untuk diambil sebesar 200000 MPa.

Jenis baja tulangan menurut SNI 2052-2017 yaitu Baja Tulangan Beton Polos (BjTP) dan Baja Tulangan Beton Sirip/Ulir (BjTS). BjTP adalah baja tulangan beton berpenampang bundar dengan permukaan rata tidak bersirip/berulir (Gambar 2.2). BjTS adalah baja tulangan beton yang permukaannya memiliki sirip/ulir melintang dan memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan guna menahan gerakan membujur dari batang secara relatif terhadap beton (Gambar 2.2 s.d. Gambar 2.5).



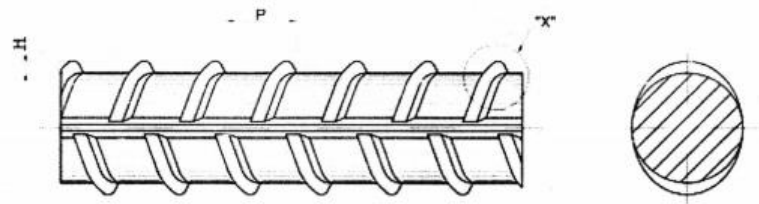
Gambar 2.2 Baja Tulangan Beton Polos

(Sumber: SNI 2052-2017)



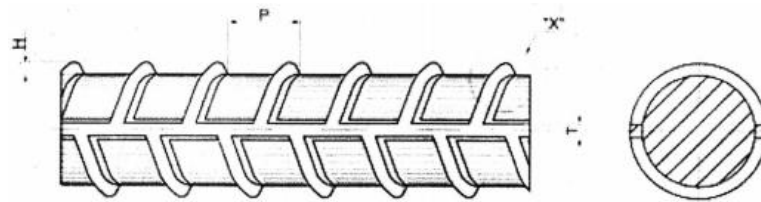
Gambar 2.3 Baja Tulangan Beton Sirip/Ulir Bambu

(Sumber: SNI 2052-2017)



Gambar 2.4 Baja Tulangan Beton Sirip/Ulir Curam

(Sumber: SNI 2052-2017)



Gambar 2.5 Baja Tulangan Beton Sirip/Ulir Tulang Ikan

(Sumber: SNI 2052-2017)

Keterangan mutu tulangan berdasarkan SNI 2052-2017 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Mekanis

Kelas Baja Tulangan	Kuat Leleh (f_y) (MPa)	Kuat Tarik (f_u) (Mpa)
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687.5

Kelas Baja Tulangan	Kuat Leleh (f_y) (MPa)	Kuat Tarik (f_u) (Mpa)
BjTS 700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805

2.4.3 Selimut Beton

Selimut beton adalah lapisan beton yang melindungi tulangan baja dalam elemen beton bertulang dari faktor eksternal seperti korosi, kebakaran, dan kerusakan mekanis. Selimut beton juga berfungsi untuk memastikan bahwa tulangan memiliki daya lekat yang baik dengan beton sehingga dapat bekerja secara efektif dalam menahan beban. Ketebalan selimut beton diatur pada SNI 2847-2019 Pasal 20.6.1.3 sebagaimana pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Ketebalan Selimut Beton untuk Komponen Struktur Nonprategang yang
Dicor di tempat

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 kecil	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 pengekan	40

2.5 Perencanaan Elemen Struktur

2.5.1 Mutu Material

Preliminary desain mutu material adalah tahap awal dalam perencanaan suatu proyek konstruksi yang bertujuan untuk memilih dan menentukan bahan material yang sesuai dengan spesifikasi dan kualitas yang dibutuhkan. Kuat tekan beton yang disyaratkan untuk sistem rangka pemikul momen khusus harus sesuai dengan persyaratan sistem pemikul gaya sesismik khusus pada SNI 2847-2019 Pasal 19.2 sebagaimana pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Batasan Nilai f_c'

Kegunaan	Jenis Beton	Nilai f_c' minimum (MPa)	Nilai f_c' maksimum (MPa)
Umum	Berat normal dan berat ringan	17	Tidak ada batasan
Sistem rangka pemikul momen khusus dan dinding struktural khusus	Berat normal	21	Tidak ada batasan
	Berat ringan	21	35

Mutu maksimum tulangan ulir untuk sistem bangunan SRPMK diatur pada SNI 2847-2019 Pasal 20.2.2 sebagaimana pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tulangan Ulir Nonprategang

Penggunaan	Aplikasi	f_y atau f_{yt} maks. Yang diizinkan untuk perhitungan desain (MPa)
Lentur; gaya aksial; susut dan suhu	Sistem seismik khusus	420
	Lainnya	550
Kekangan lateral dari batang longitudinal atau kekangan beton	Sistem seismik khusus	700
	Spiral	700
	Lainnya	550
Geser	Sistem seismik khusus	420

Penggunaan	Aplikasi	f_y atau f_{yt} maks. Yang diizinkan untuk perhitungan desain (MPa)
	Spiral	420
	Geser friksi	420
	Senggang, senggang ikat, senggang pengegang	420
		550
Torsi	Longitudinal dan transversal	420

2.5.2 Balok

2.5.2.1 Preliminary Desain Balok

Tinggi minimum balok prategang berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.3.1 dapat dihitung dengan persamaan pada Tabel 2.5:

Tabel 2.5 Tinggi Minimum Balok Prategang

Kondisi Perlekatan	Minimum (h)
Perlekatan Sederhana	$l/16$
Menerus Satu Sisi	$l/18.5$
Menerus Dua Sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

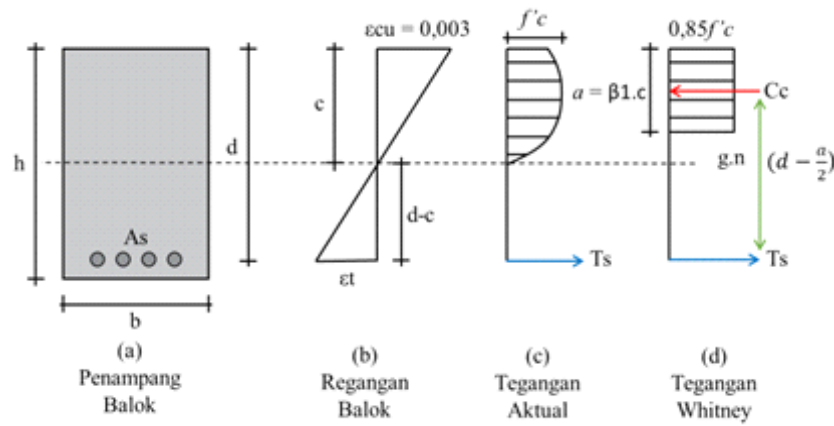
Adapun untuk jenis struktur SRPMK, batasan dimensi balok harus memenuhi syarat berikut:

1. Bentang bersih, l_n harus minimal $4d$.
2. Lebar penampang b_w , harus sekurang-kurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm.
3. Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75 c_1$ pada masing-masing sisi kolom

2.5.2.2 Kuat Lentur Balok

2.5.2.2.1 aTulangan Tunggal (*Single Reinforced*)

Perilaku lentur balok tulangan tunggal berdasarkan tegangan-regangan akibat momen lentur digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kondisi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Tunggal

(Sumber: Tampubolon, 2022)

Berdasarkan Gambar 2.6 (b), nilai regangan tarik dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varepsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \varepsilon_{cu} \quad (2.2)$$

Dimana,

ε_t : Regangan tulangan tarik *netto*.

d_t : Jarak tulangan tarik terluar dari penampang balok.

ε_{cu} : Regangan maksimum serat tekan penampang beton (0.003).

Sedangkan nilai regangan leleh tulangan tarik (ε_{ty}) dimana $f_y = 400 \text{ MPa}$ dan $E = 200000 \text{ MPa}$ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varepsilon_{ty} = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200} = 0.002 \quad (2.3)$$

Jenis penampang beton bertulang berdasarkan besaran regangannya (ε_t) tercantum pada SNI 2847-2019 sebagai berikut:

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

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

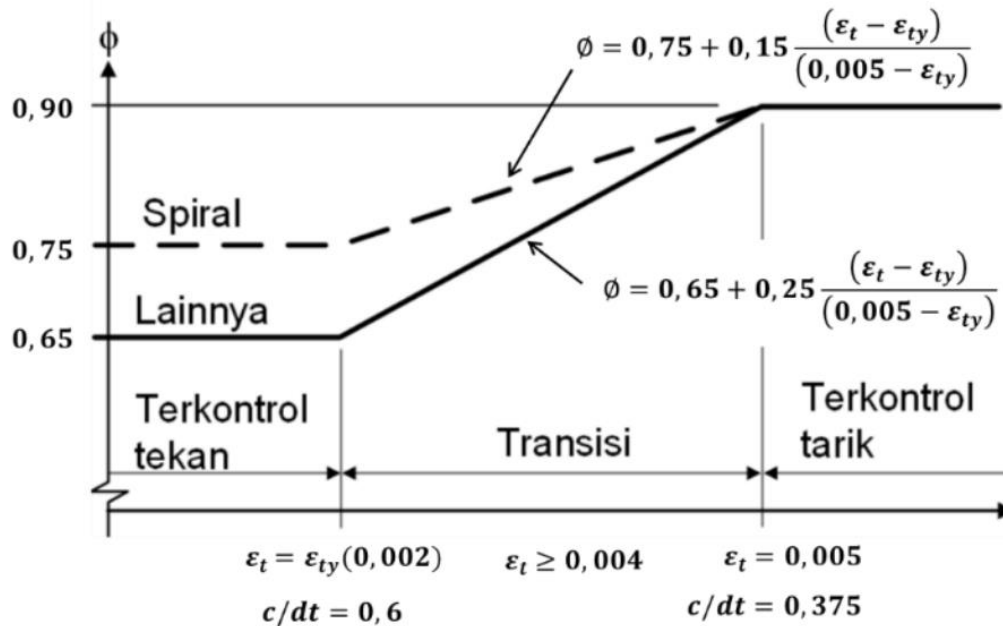
$\varepsilon_t \geq \varepsilon_{ty}$: Penampang terkendali tarik (*under reinforced*), keruntuhan daktail

Parameter ε_t dapat diganti dengan c/d_t , berdasarkan Gambar 2.6 (b) c/d_t dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varepsilon_t = 0.005 \quad (2.4)$$

$$\frac{c}{d_t} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_t} = 0.375 \quad (2.5)$$

Fenomena ini akan mempengaruhi ilai faktor reduksi (ϕ) yang digunakan. Nilai faktor reduksi ini dibagi menjadi dua berdasarkan sengkang yang digunakan (Gambar 2.7) sebagaimana diatur pada SNI 2847-2019 Pasal 21.2.2.



Gambar 2.7 Variasi Nilai Faktor Reduksi

(Sumber:SNI 2847-2019)

Distribusi tegangan tekan pada penampang balok (Gambar 2.6 (c)) kemudian disederhanakan sebagaimana tercantum pada Gambar 2.6 (d). Nilai β_1 berdasarkan SNI 2847-2019 sebagaimana tercantum pada Tabel 2.6 berikut:

Tabel 2.6 Nilai β_1 untuk Distribusi Tegangan Beton Persegi Ekuivalen

f'_c MPa	β_1
$17 \leq f'_c \leq 28$	0.85
$28 \leq f'_c \leq 55$	$0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$
$f'_c \geq 55$	0.65

Kapasitas momen nominal (M_n) dapat dihitung berdasarkan gaya-gaya yang timbul pada penampang balok. Nilai gaya aksial tekan balok (P_u) harus kurang dari $0.1A_g f'_c$.

Gaya tekan dari beton (C_c)

$$C_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.6)$$

Gaya tarik dari tulangan (T_s)

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (2.7)$$

Momen nominal (M_n)

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) = T_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.8)$$

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

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.9)$$

Luas tulangan (A_s)

$$A_s = \rho b d \quad (2.10)$$

Koefisien kapasitas penampang (R_n)

$$R_n = \frac{M_n}{b d^2} \quad (2.11)$$

Rasio tulangan (ρ)

$$\rho = 0.85 \frac{f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right) \quad (2.12)$$

Rasio tulangan berimbang (ρ_b)

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.13)$$

Batas maksimum rasio tulangan (ρ_{max})

$$\rho_{max} = \frac{0.003 + \frac{f_y}{E_s}}{0.003 + \varepsilon_t} \rho_b \quad (2.14)$$

atau sesuai SNI 2847-2019 asal 18.6.3.1

$$\rho_{max} = 0.025 \quad (2.15)$$

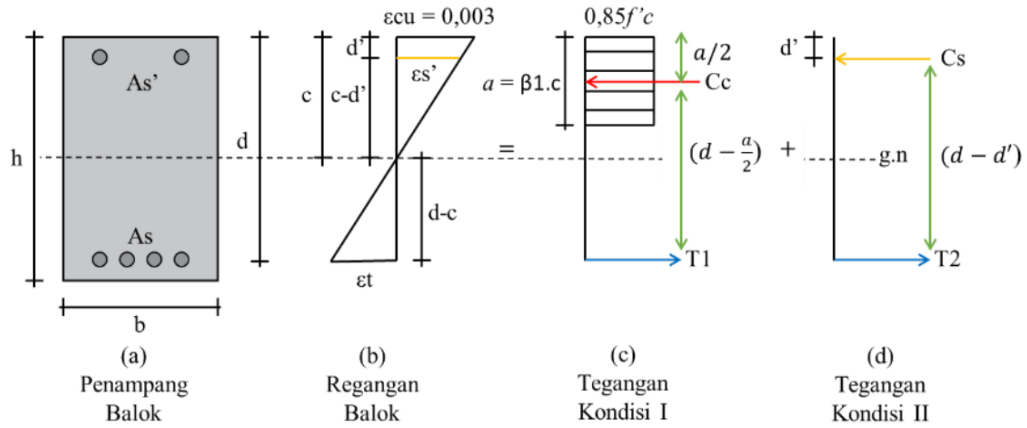
Batas minimum rasio tulangan (ρ_{min}) adalah nilai terbesar dari

$$\rho_{min} = \frac{0.25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \quad (2.16)$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (2.17)$$

2.5.2.2.2 Tulangan Rangkap (*Double Reinforced*)

Perilaku lentur balok tulangan rangkap berdasarka tegangan-regangan akibat momen lentur digambarkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kondisi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Rangkap

(Sumber: Tampubolon, 2022)

Pada analisis gaya tekan, tulangan tarik (T) dibagi menjadi $T1$ (Kondisi I) dan $T2$ (Kondisi II) dan dapat ditulis $T = T1 + T2$. Momen nominal pada kondisi I dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

Gaya tekan pada beton (C_C)

$$C_C = 0.85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \quad (2.18)$$

Gaya tarik pada tulangan ($T1$)

$$T1 = A_{s1} f_y \quad (2.19)$$

Momen nominal pada kondisi I (M_{n1})

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.20)$$

Luas tulangan tarik (A_s)

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.21)$$

Sedangkan momen nominal pada kondisi II dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

Gaya tarik pada tulangan ($T2$)

$$T1 = A_{s2} f_y \quad (2.22)$$

Gaya tekan dari tulangan (C_s)

$$C_s = A'_s f'_s \quad (2.23)$$

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

$$A'_s = A_{s2} \quad (2.24)$$

Momen nominal (M_n) untuk balok beton bertulang tulangan rangkap berdasarkan kondisi I dan II adalah sebagai berikut:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.25)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.26)$$

$$C_c = C_s - T = (A'_s f'_s) - A_{s1} f_y \quad (2.27)$$

$$M_n = [(A'_s f'_s) - (A_{s1} f_y)] \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s f'_s)(d - d') \quad (2.28)$$

Jika $M_{n1} < M_n$, maka diperlukan tulangan tekan dan digunakan perhitungan tulangan rangkap. Sedangkan jika $M_{n1} > M_n$, maka tidak diperlukan tulangan tekan dan digunakan perhitungan tulangan tunggal.

Dalam analisis tulangan rangkap, terdapat kondisi tulangan sudah leleh ($f'_s > f_y$) sehingga tegangan leleh pada tulangan tekan diambil sama dengan f_y . Kondisi yang kedua, tulangan belum leleh ($f'_s < f_y$) sehingga tegangan leleh pada tulangan tekan tetap f'_s . Nilai tegangan tulangan tekan (f'_s) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\epsilon'_s = 0.003 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.29)$$

$$f'_s = E_s \cdot \epsilon'_s = 600 \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.30)$$

2.5.2.3 Kuat Geser Balok

Kuat geser nominal (V_n) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.31)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019, persyaratan geser nominal dengan faktor reduksi ($\phi = 0.75$) untuk metode desain kuat geser balok adalah sebagai berikut:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.32)$$

Dimensi penampang balok harus mampu memikul beban geser dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_u \leq \phi V_n = \phi (V_c + 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d) \quad (2.33)$$

M_u dan V_u terjadi secara serentak pada penampang balok ketika menerima pembebanan dengan syarat sebagaimana pada persamaan berikut:

$$\frac{V_u \cdot d}{M_u} < 1.0 \quad (2.34)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019 nilai kuat geser beton (V_c) diatur pada Pasal 22.5.5.1 atau lebih detail pada Tabel 22.5.5.1 yang kemudian diambil nilai terkecil.

$$V_c = 0.17\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.35)$$

$$V_c = \left(0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u \cdot d}{M_u}\right) b_w d \quad (2.36)$$

$$V_c = (0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w) b_w d \quad (2.37)$$

$$V_c = 0.29\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.38)$$

Dimana,

λ : Faktor modifikasi, untuk beton normal = 1.0

ρ_w : Rasio tulangan tarik ($A_s/b_w d$)

V_u : Gaya geser *ultimate* hasil analisis struktur (N)

M_u : Momen *ultimate* hasil analisis struktur (Nmm)

b_w : Lebar penampang balok (mm)

d : Tinggi efektif balok (mm)

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

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s} < V_{s, max} = 0.66\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.39)$$

Rasio tulangan geser (A_v) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_{yt} d} \quad (2.40)$$

$$A_v = n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi D^2 \quad (2.41)$$

Dimana,

s : Jarak tulangan geser

n : jumlah kaki tulangan geser (sengkang)

Jumlah luasan minimum ($A_{v min}$) tulangan geser ditentukan berdasarkan nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$\frac{A_{v min}}{s} = 0.062\sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.42)$$

$$\frac{A_v min}{s} = \frac{0.35 b_w s}{f_{yt}} \quad (2.43)$$

Dalam menentukan jarak tulangan geser (s), nilai jarak maksimum perlu dipertimbangkan dengan mengambil nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$V_s \leq V_{c1} = 0.33 \sqrt{f'_c} b_w d ; S_{maks} = \frac{d}{2} \text{ atau } 600 \text{ mm} \quad (2.44)$$

$$V_s > V_{c1} = 0.33 \sqrt{f'_c} b_w d ; S_{maks} = \frac{d}{4} \text{ atau } 300 \text{ mm} \quad (2.45)$$

2.5.2.4 Momen Torsi Balok

Pengaruh torsi pada penampang balok (T_u) berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.7.1.1 dapat diabaikan apabila memenuhi persyaratan berikut terpenuhi.

$$\phi T_{th} \geq T_u \quad (2.46)$$

$$T_{th} = 0.083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.47)$$

Dimana,

T_u : Nilai torsi terfaktor dari hasil analisis struktur (Nmm)

T_{th} : Nilai torsi *threshold* (Nmm)

ϕ : Faktor reduksi (0.75)

λ : Faktor modifikasi (untuk beton normal = 1.0)

A_{cp} : Luas yang dibatasi oleh keliling luar penampang beton (m^2)

P_{cp} : Keliling luar penampang beton (mm)

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal C batasan penampang balok dalam pengaruh torsi sesuai dengan persamaan berikut:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1.7 A_{oh}^2} \right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0.66 \sqrt{f'_c} \right) \quad (2.48)$$

Dimana,

A_{oh} : Luas daerah dalam tulangan geser (mm^2)

P_h : Keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

Jika penampang tidak memenuhi syarat, maka dimensi penampang diperbesar.

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.7.6.1 nilai kuat nominal torsi (T_n) dihitung dengan mengambil nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.49)$$

$$T_n = \frac{2A_o A_l f_y}{P_h} \cot \theta \quad (2.50)$$

Dimana,

T_n : Kuat nominal torsi (Nmm)

A_o : Luas bruto yang dilingkup oleh lintasan alir geser, $A_o = 0.85A_{oh}$ (mm²)

A_t : Luas 1 kaki sengkang tertutup yang menahan torsi dalam spasi s (mm²)

A_l : Kuat momen torsi nominal (Nmm)

f_{yt} : Kuat leleh tulangan transversal (MPa)

f_y : Kuat leleh tulangan yang disyaratkan (MPa)

s : Spasi tulangan transversal yang terpasang (mm)

θ : 45° untuk balok beton nonprategang

Berdasarkan SNI 2847-2019 pengaruh torsi diproyeksikan pada tulangan transversal dan tulangan memanjang dengan jumlahluasan minimal dari tulang tersebut adalah sebagai berikut:

1. Tulangan transversal (torsi)

Luasan minimum yang digunakan harus lebih besardari persamaan berikut:

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{min}}{s} \geq 0.062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.51)$$

$$\frac{(A_v + 2A_t)_{min}}{s} \geq 0.35 \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.52)$$

Dimana,

A_v : luasan tulangan geser

$$A_t = \frac{T_u \cdot s}{\phi 2 A_o f_{yt}} \tan \theta \quad (2.53)$$

2. Tulangan longitudinal (torsi)

Luas tulangan longitudinal (A_l) dapat dihitung dengan persamaan brikut:

$$A_l = \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y} \right) \cot^2 \theta \quad (2.54)$$

$$A_l = \frac{T_u \cdot P_h}{\phi 2 A_o f_y} \cot \theta \quad (2.55)$$

Luasan minimum tulangan ($A_{l \min}$) adalah nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$A_{l \min} = 0.42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.56)$$

$$A_{l \min} = 0.42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0.175 b_w}{f_{yt}} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.57)$$

Batasan spasi tulangan torsi berdasarkan SNI 2847-2019 adalah sebagai berikut:

$$s \leq \frac{P_h}{8} \leq 300 \text{ mm}, \text{ untuk tulangan transversal} \quad (2.58)$$

$$s \leq (b_t + d), \text{ untuk tulangan longitudinal} \quad (2.59)$$

Batasan mutu material dalam analisis torsi yaitu mutu beton bertulang $\sqrt{f'_c} \leq 8.3 \text{ MPa}$ sedangkan mutu tulangan harus memenuhi syarat f_y atau $f_{yt} \leq 420 \text{ MPa}$.

2.5.3 Pelat Lantai

2.5.3.1 Preliminary Desain Pelat

Pelat lantai adalah elemen struktural horizontal yang berfungsi untuk mendistribusikan beban dari atas ke elemen pendukung di bawahnya, seperti balok atau kolom. Pelat lantai dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan arah distribusi beban dan bentuknya, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah.

Pelat lantai satu arah adalah pelat yang dirancang untuk menahan beban yang bekerja terutama dalam satu arah. Pelat ini biasanya memiliki bentang yang lebih panjang dalam satu arah dibandingkan dengan arah lainnya. Beban yang bekerja pada pelat satu arah umumnya terdistribusi secara merata sepanjang satu arah, sedangkan arah lainnya dianggap sebagai dukungan. Pelat ini biasanya didukung oleh balok di dua sisi yang berlawanan, sehingga beban akan ditransfer ke balok tersebut. Sedangkan pelat lantai dua arah adalah pelat yang dirancang untuk menahan beban yang bekerja dalam dua arah. Pelat ini memiliki bentang yang hampir sama dalam kedua arah, sehingga dapat mendistribusikan beban secara lebih merata. Beban yang bekerja pada pelat dua arah terdistribusi secara merata dalam dua arah, sehingga pelat dapat menahan momen lentur dan gaya geser dari kedua arah. Pelat ini biasanya didukung oleh balok di keempat sisinya, sehingga beban akan ditransfer ke semua balok yang ada di sekelilingnya. Jenis pelat satu arah atau dua arah dapat diidentifikasi melalui persamaan berikut:

$$\frac{l_p}{b_p} > 2, \text{ untuk pelat satu arah} \quad (2.60)$$

$$\frac{l_p}{b_p} \leq 2, \text{ untuk pelat dua arah} \quad (2.61)$$

Ketebalan minimum pelat satu arah berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 7.3.1 adalah sebagaimana tercantum pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Ketebalan minimum Pelat Solid Satu Arah Nonprategang

Kondisi Tumpuan	Minimum (h)
Tumpuan sederhana	$l/20$
Satu ujung menerus	$l/24$
Kedua ujung menerus	$l/28$
Kantilever	$l/10$

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 8.3.12 ketebalan minimum pelat dua arah non prategang dengan balok di antara tumpuan pada semua sisinya tercantum pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Ketebalan minimum Pelat Dua Arah Nonprategang

$\alpha_{fm}^{[1]}$	h minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0.2$	8.3.1.1 berlaku	
$0.2 \leq \alpha_{fm} \leq 2.0$	Terbesar dari:	$\frac{l_n \left(0.8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0.2)}$
$\alpha_{fm} > 0.2$	Terbesar dari:	$\frac{l_n \left(0.8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta}$
		90

2.5.3.2 Penulangan Pelat

Luas minimum tulangan lentur pelat ($A_{s \min}$) disesuaikan dengan Tabel 2.9 berikut:

Tabel 2.9 Minimum Tulagan Lentur Pelat Sat Arah

Tipe Tulangan	f_y (MPa)	$A_{s \min}$
Batang ulir	< 420	$0.002A_g$
	≥ 420	$\frac{0.0018 \cdot 420}{f_y} A_g$

Batang ulir atau kawat las		$0.0014A_g$
----------------------------	--	-------------

Luasan toal penampang (A_g) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_g = b \cdot h \quad (2.62)$$

Dimana,

b : Lebar pelat per satuan meter

h : Tebal pelat (m)

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 7.7.2.3 spasi maksimum tulangan harus kurang dari $3h$ dan 450 mm. Luasan minimum tulangan susut dan tulangan lentur sama, yang membedakan yaitu tulangan susut penyajiannya dalam bentuk rasio tulangan, sedangkan pada tulang lentru dalam bentuk luasan. Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 24.4.3.3 spasi tulangan susut tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $5h$ dan 450 mm.

2.5.3.3 Kontrol Lendutan Pelat

2.5.3.3.1 Lendutan Seketika

Lendutan seketika terjadi segera setelah beban bekerja kemudian terjadi lendutan. Momen inersia efektif (I_e) berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 24.4.3.3 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} < I_g \quad (2.63)$$

$$f_{cr} = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (2.64)$$

$$M_{cr} = \frac{F_{cr}I_g}{y} \quad (2.65)$$

Dimana,

M_{cr} : Momen pada saat timbul retak yang pertama kali (SNI 2847-2019 Pasal 24.4.3.5)

M_a : Momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung (*Output Software*)

f_{cr} : Tegangan retak beton (SNI 2847-2019 Pasal 24.5.2.1)

y : Tebal pelat (t_p) / 2 (jarak dari garis netral penampang utuh)

$I_{cr} : \frac{1}{12} b t_p^3$ (momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang)

Apabila $\frac{M_{cr}}{M_a} > 1$ maka pelat tidak retak, sehingga digunakan $M_{cr} = M_u$ dan $I_{cr} =$

I_g . Apabila $\frac{M_{cr}}{M_a} \leq 1$ maka pelat retak, sehingga I_e harus dihitung.

Lendutan seketika untuk pelat menerus dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0.1(M_a + M_b)] \quad (2.66)$$

Apabila momen tumpuan kiri dan kanan sama maka digunakan persamaan berikut:

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0.1M_{tumpuan}] \quad (2.67)$$

Dimana,

δ_i : Lendutan seketika ditengah bentang

L : Panjang pela

E_c : Modulus elastisitas beton

I_g : $(I_{e\ lap} + I_{e\ tump})/2$ (momen inersia)

M_a, M_b : Momen lentur negatif di tumpuan

M_m : Momen di lapangan (tengah bentang)

Batasan lendutan seketika pelat lantai akibat beban hidup berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 24.2.2 adalah $L/360$.

2.5.3.3.2 Lendutan Jangka Panjang

Lendutan jangka panjang (Δ_{LT}) timbul secara berangsur-angsur dalam jangka waktu lama yang disebabkan oleh rangkai dan susut beton. Lendutan jangka panjang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta_{LT} = (\delta_{i\ DL+SIDL})\lambda_{\Delta} + \delta_{i\ LL} \quad (2.68)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 24.2.4.1.1 nilai λ_{Δ} dihitung dengan persamaan berikut:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1+50\rho} \quad (2.69)$$

Dimana,

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

ρ : A_s/bd (rasio Tulangan)

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

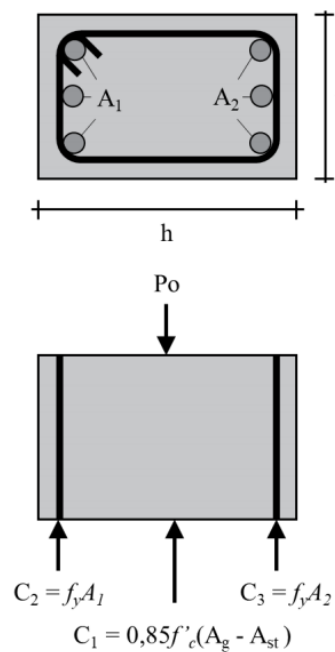
2.5.4 Kolom

2.5.4.1 Preliminary Desain Kolom

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 18.7.2.1 dalam merancang dimensi kolom harus memenuhi syarat berikut:

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

2.5.4.2 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan Sentris



Gambar 2.9 Kolom dengan Beban Tekan Sentris

(Sumber: Candra, 2024)

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.4.2.2 kuat dari kolom (P_o) yang menerima beban tekan sentris (Gambar 2.9) dengan rasio tulangan 1% – 8% dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_o = 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \quad (2.70)$$

$$\rho = \frac{A_{st}}{A_g} \quad (2.71)$$

Dimana,

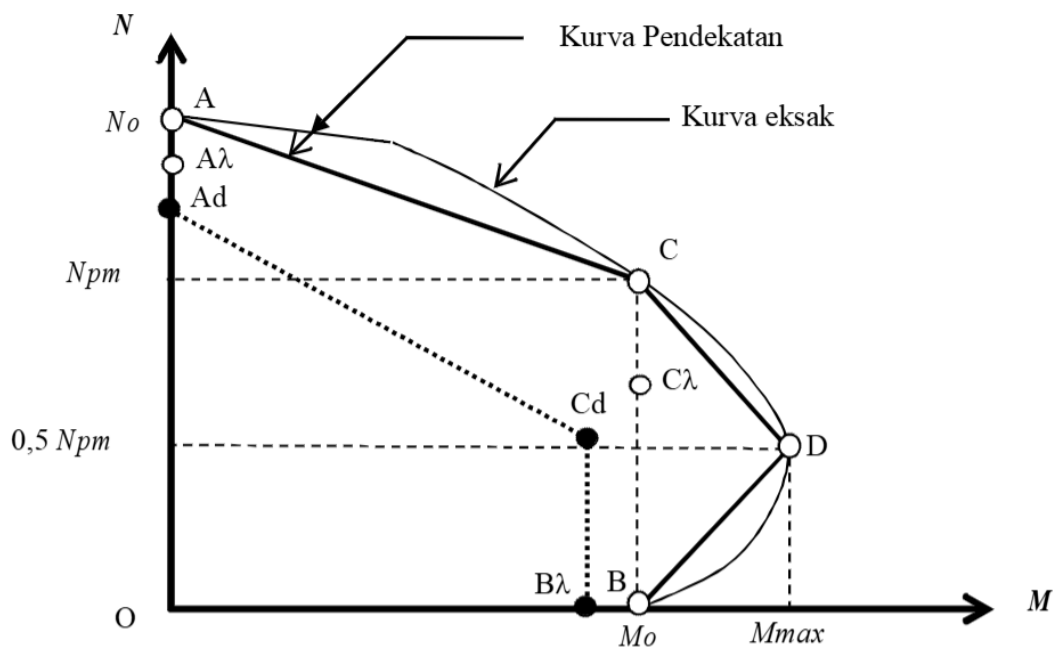
A_g : Luasan penampang kolom.

A_{st} : Luasan tulangan longitudinal kolom.

Kekuatan tekan aksial nominal (P_n) tidak boleh melebihi $P_{n\max}$, $0.80P_o$ untuk sengkang persegi dan $0.85P_o$ untuk sengkang spiral.

2.5.4.3 Kolom Beton dengan Beban Aksial Tekan dan Momen

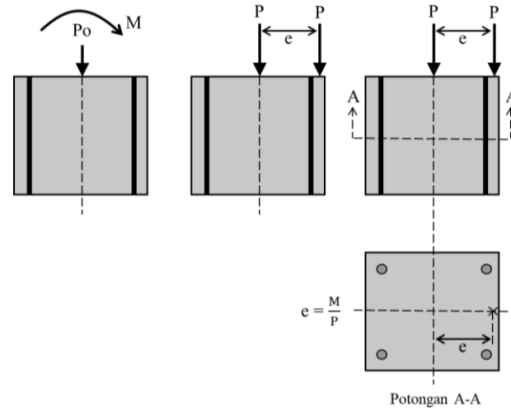
Interaksi dari gaya aksial tekan (P) dan (M) digambarkan dalam sebuah kurva seperti pada Gambar 2.10. Untuk mendesain kekuatan kolom dibagi menjadi tiga daerah. Semua penampang yang termasuk terkendali tekan mempunyai faktor reduksi $\phi = 0.65$ (sengkang persegi) dan $\phi = 0.75$ (sengkang spiral). Pada daerah transisi mempunyai faktor reduksi $0.65 - 0.9$ (sengkang persegi) dan $0.75 - 0.9$ (sengkang spiral). Untuk penampang terkendali tarik mempunyai faktor reduksi $\phi = 0.9$.



Gambar 2.10 Diagram Interaksi P-M Elemen Kolom

(Sumber: (Sugupta, 2011))

Ketika kolom menerima beban tekan eksentris, maka kolom akan menerima pengaruh tekan sekaligus tarik sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.11 berikut:



Gambar 2.11 Kolom dengan beban teka eksentris

(Sumber: Candra, 2024)

Nilai tekan aksial pada saat kondisi regangan berimbang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_b = 0.85f'_c \beta_1 c_b b + A'_s (f_y - 0.85f'_c) - A_s f_y \quad (2.72)$$

Persamaan momen akibat gaya eksentrisitas dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_b = P_b \cdot e_b = C_c \left(d - \frac{a}{2} - d \right) + C_s (d - d' - d) + T_d'' \quad (2.73)$$

2.5.4.4 Desain Geser Pada Kolom

Nilai V_c diambil dari nilai terkecil dari persamaan berikut:

$$V_c = 0.17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.74)$$

$$V_c = \left[0.16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.75)$$

$$V_c = 0.29 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{1 + \frac{0.29 N_u}{A_g}} \quad (2.76)$$

Dimana,

N_u : Gaya aksial

V_u : Gaya geser

M_u : Momen terfaktor

d : $0.8h$

$$\text{Persamaan } V_c = \left[0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8}} \right] b_w d$$

(2.75) tidak perlu digunakan jika $M_u - N_u(4h - d)/8 \leq 0$.

2.6 Pembebanan

Proses pembebanan struktur dilakukan dengan membebani struktur dengan beban-beban yang nantinya akan bekerja pada struktur guna memastikan kelayakan perencanaan gedung dari segi keamanan dan kekuatannya. Identifikasi pembebanan struktur mengacu pada SNI 1727-2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait, sedangkan untuk identifikasi pembebanan gempa pada struktur mengacu pada SNI 1726-2019 mengenai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung.

2.6.1 Beban Statis

Beban statis adalah beban yang tidak berubah seiring waktu dan biasanya dianggap konstan selama periode analisis. Beban ini dapat berasal dari berbagai sumber dan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap desain dan analisis struktur. Dalam konteks struktur bangunan, beban statis dapat dibagi menjadi beberapa kategori, termasuk beban mati, beban hidup, beban air hujan, dan beban angin.

2.6.1.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah beban yang berasal dari berat sendiri struktur dan semua elemen permanen yang terpasang pada struktur termasuk material bangunan seperti beton, baja, dinding, atap, dan elemen struktural lainnya. Beban mati bersifat konstan dan tidak berubah seiring waktu, sehingga dapat dihitung dengan akurat.

Nilai beban mati yang digunakan berdasarkan PPPURG-1987 tercantum pada Tabel 2.10 dan Tabel 2.11.

Tabel 2.10 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No.	Material	Berat (kg/m ³)	Keterangan
1	Baja	7850	
2	Batu alam	2600	
3	Batu belah, batu bulat, batu gunung	1500	Berat tumpuk
4	Batu karang	700	Berat tumpuk
5	Batu pecah	1450	
6	Besi tuang	7250	
7	Beton	2200	
8	Beton bertulang	2000	
9	Kayu	1000	Kelas I
10	Kerikil, koral	1650	Kering udara sampai lembab, tana diayak
11	Pasangan bata merah	1700	
12	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200	
13	Pasangan batu cetak	2000	
14	Pasangan batu karang	1450	
15	Pasir	1600	Kering udara sampai lembab
16	Pasir	1800	Jenuh air
17	Pasir kerikil, koral	1850	Kering udara sampai lembab
18	Tanah, lempung dan lanau	1700	Kering udara sampai lembab
19	Tanah, lempung dan lanau	2000	Basah
20	Timah hitam / timbel	11400	

Tabel 2.11 Berat Sendiri Komponen Gedung

No.	Material	Berat (kg/m ²)	Keterangan
1	Adukan, per cm tebal:		
	- dari semen	21	
	- dari kapur, semen merah/tras	17	
2	Aspal, per cm tebal	14	
3	Dinding pasangan bata merah:		
	- satu batu	450	
	- setengah batu	250	
4	Dinding pasangan batako:		
	- berlubang:		
	tebal dinding 20 cm (HB 20)	200	
	tebal dinding 10 cm (HB 10)	120	
	- tanpa lubang:		
	tebal dinding 15 cm	300	
	tebal dinding 10 cm	200	
5	Langit-langit & dinding, terdiri:		termasuk rusuk-rusuk, tanpa pengantung atau pengaku
	- semen asbes (eternit), tebal maks. 4 mm	11	
	- kaca, tebal 3-5 mm	10	
6	Lantai kayu sederhana dengan balok kayu	40	tanpa langit-langit, bentang maks. 5 m, beban hidup maks. 200 kg/m ²
7	Penggantung langit-langit (kayu)	7	bentang maks. 5 m, jarak s.k.s. min. 0.80 m

No.	Material	Berat (kg/m ²)	Keterangan
8	Penutup atap genteng	50	dengan reng dan usuk / kaso per m ² bidang atap
9	Penutup atap sirap	40	dengan reng dan usuk / kaso per m ² bidang atap
10	Penutup atap seng gelombang (BJLS-25)	10	tanpa usuk
11	Penutup lantai ubin, per cm tebal	24	ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan
12	Semen asbes gelombang (5 mm)	11	

2.6.1.2 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban yang berasal dari penggunaan struktur dan dapat berubah seiring waktu. Beban ini mencakup beban yang ditambahkan ke struktur oleh penghuni, perabotan, peralatan, dan aktivitas lainnya. Beban hidup bersifat variabel dan dapat berubah tergantung pada penggunaan ruang. Nilai hidup mati yang berdasarkan SNI 1727-2020 tercantum pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum (L_o) dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata. L_o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terpusat (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)				
Sistem Lantai Akses				
• Ruang Kantor	2.4	Ya	Ya	8.9
• Ruang Komputer	4.79	Ya	Ya	8.9

Hunian atau Penggunaan	Merata. L_o (kN/m²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
Gudang persenjataan dan ruang latihan	7.18	Tidak	Tidak	
Ruang Pertemuan <ul style="list-style-type: none"> Kursi tetap (terkait lantai) Lobi Kursi dapat dipindahkan Panggung pertemuan Lantai podium Tribun penonton stadion dan arena Ruang pertemuan lainnya 	2.87 4.79 4.79 4.79 7.18 4.79 2.87 4.79	Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak	Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak Tidak	
Balkon dan dek	1.5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani, tidak perlu melebihi 4.79 kN/m ²	Ya	Ya	
Jalur akses pemeliharaan	1.92	Ya	Ya	1.33
Koridor				

Hunian atau Penggunaan	Merata. L _o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
<ul style="list-style-type: none"> Lantai pertama Lantai lain 	4.79 Sama seperti pelayana n hunian kecuali disebutk an lain	Ya	Ya	
Ruang makan dan restoran	4.79	Tidak	Tidak	
Hunian (lihat rumah tinggal)				
Dudukan mesin elevator (pada area 50 mm x 50 mm)				1.33
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 25 mm x 25 mm)				0.89
Jalur penyelamatan sat keakaran	4.79	Ya	Ya	
<ul style="list-style-type: none"> Hunian satu keluarga saja 	1.92	Ya	Ya	
Tangga permanen				Pasal 4.5.4
Garasi/parkir (pasal 4.10)				
<ul style="list-style-type: none"> Mobil penumpang saja 	1.92			Pasal 4.10.1
<ul style="list-style-type: none"> Truk dan bus 	Pasal 4.10.2			Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman	Lihat 4.5.1			Lihat 4.5.1
<ul style="list-style-type: none"> Batang pegangan 				

Hunian atau Penggunaan	Merata. L_o (kN/m²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
				Lihat 4.5.2
Helipad (Pasal 4.11)				
• Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 13.35 kN atau kurang	1.92	Tidak		Pasal 4.11.2
• Helikopter dengan berat lepas landas lebih dari 13.35 kN	2.87	Tidak		Pasal 4.11.2
Rumah sakit				
• Ruang operasi, laboratorium	2.87	Ya	Ya	4.45
• Ruang pasien	1.92	Ya	Ya	4.45
• Koridor di atas lantai pertama	3.83	Ya	Ya	4.45
Hotel (lihat rumah tinggal)				
Perpustakaan				
• Ruang baca	2.87	Ya	Ya	4.45
• Ruang penyimpanan	7.18	Tidak	Ya	4.45
• Koridor di atas lantai pertama	3.83	Ya	Ya	4.45
Pabrik				
• Ingan	6	Tidak	Ya	8.9
• Berat	11.97	Tidak	Ya	13.35
Gedung perkantoran				
• Uang arsip dan ruang komputer harus dirancang untuk bebban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian	4.79	Ya	Ya	8.9

Hunian atau Penggunaan	Merata. L _o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
<ul style="list-style-type: none"> Lobi dan koridor lantai pertama Kantor Koridor di atas lantai pertama 	2.40 3.83	Ya Ya	Ya Ya	8.9 8.9
Lembaga hukum <ul style="list-style-type: none"> Balok sel Koridor 	1.92 4.79	Ya Ya	Ya Ya	
Tempat rekreasi <ul style="list-style-type: none"> Tempat <i>bowling</i>, <i>billiard</i>, dan penggunaan sejenis Ruang dansa dan <i>ballroom</i> Gimnasium 	3.59 4.79 4.79	Tidak Tidak Tidak	Tidak Tidak Tidak	
Rumah tinggal <ul style="list-style-type: none"> Hunian satu dan dua keluarga <ul style="list-style-type: none"> Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang Semua ruang kecuali tangga Semua hunian rumah tinggal lainnya <ul style="list-style-type: none"> Ruang pribadi dan koridornya Ruang publik Koridor ruang publik 	0.48 0.96 1.92 1.92 4.79 4.79	Ya Ya Ya Ya Tidak Ya	Ya Ya Ya Ya Tidak Ya	
Atap				

Hunian atau Penggunaan	Merata. L _o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
<ul style="list-style-type: none"> • Ata datar, berbubung, dan lengkung • Atap yang digunakan penghuni 	0.96	Ya		
<ul style="list-style-type: none"> • Atap untuk tempat berkumpul • Atap vegetatif dan lansekap 	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya		
<ul style="list-style-type: none"> - Atap bukan untuk hunian - Atap untuk tempat berkumpul - Atap untuk penggunaan lainnya 	4.7	Ya		
	0.96	Ya		
	4.79	Ya		
	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya		
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Awning</i> dan kanopi - Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan 	0.24	Tidak		
<ul style="list-style-type: none"> • Rangka penumpu layar penutup 	0.24	Tidak	0.89	
<ul style="list-style-type: none"> • Semua konstruksi lainnya • Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung 	0.96	Ya		

Hunian atau Penggunaan	Merata. L_o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
dengan pekerjaan lantai tempat bekerja			9.90	
- Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap di atas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjaanya, dan garasi bengkel			1.33	
- Semua komponen struktur atap lainnya			1.33	
• Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemelihara				
Sekolah				
• Ruang kelas	1.92	Ya	Ya	4.45
• Koridor di atas lantai pertama	3.83	Ya	Ya	4.45
• Koridor Lantai pertama	4.79	Ya	Ya	4.45
<i>Scuttles</i> , rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses				0.89
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk truk	11.97	Tidak	Ya	35.60
Tangga dan jalan keluar	4.79	Ya	Ya	1.33
• Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	1.92	Ya	Ya	1.33
Gudang di atas langit-langit	0.96	Ya	Ya	

Hunian atau Penggunaan	Merata. L _o (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidu	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak	Terp usat (kN)
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan)				
• Ringan	6.00	Tidak	Ya	
• Berat	11.97	Tidak	Ya	
Toko				
• Eceran				
- Lantai pertama	4.79	Ya	Ya	4.45
- Lantai diatasnya	3.59	Ya	Ya	4.45
• Grosir di semua lantai	6.00	Tidak	Ya	4.45
Penghalang kendaraan				Pasal 4.5.3
Susuran jalan dan panggung yang diinggikan (selain jalan keluar)	2.87	Ya	Ya	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	4.79	Tidak	Tidak	

2.6.1.3 Beban Air Hujan

Beban air hujan adalah beban yang dihasilkan oleh akumulasi air hujan pada permukaan atap atau elemen struktur lainnya. Setiap bagian dari atap harus dirancang untuk mampu menahan beban dari air hujan yang terakumulasi apabila sistem drainase primer pada bagian tersebut terhambat ditambah beban merata akibat kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran desainnya. Besar beban air hujan berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 8.3 adalah sebagai berikut:

$$R = 0.0098 \times (d_s + d_h) \quad (2.77)$$

Dimana,

R : Beban air hujan (kN/m^2)

d_s : Tinggi hidraulik (mm)

d_h : Tinggi kepala hidraulik (mm)

2.6.1.4 Beban Angin

Beban angin adalah beban yang dihasilkan oleh tekanan angin yang bekerja pada permukaan struktur. Beban ini dapat bervariasi tergantung pada kecepatan angin, arah angin, dan bentuk struktur. Beban angin bersifat dinamis dan dapat berubah seiring waktu, tergantung pada kondisi cuaca.

2.6.1.4.1 Kategori Resiko Bangunan (KRG)

Kategori resiko bangunan berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 4.1 yang didasarkan pada fungsi bangunan sebagaimana pada Tabel 2.17.

2.6.1.4.2 Kecepatan Angin Dasar (v)

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.5.1. kecepatan angin dasar yang digunakan dalam menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain harus ditentukan dari Buku Peta Angin Indonesia. Angin harus diasumsikan datang dari segala arah horizontal dan kecepatan angin dasar harus diperbesar jika catatan atau pengalaman menunjukkan kecepatan angin lebih tinggi daripada yang tercantum dalam Buku Peta Angin Indonesia.

2.6.1.4.3 Faktor Arah Angin (K_a)

Faktor arah angin berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.5.3 adalah sebagaimana tercantum pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Faktor Arah Angin

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0.85
Komponen dan Klading (K&K)	0.85
Atap lengkung	0.85

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (Kd)
Kubah berbentuk bundar	1.0
Cerobong, tangki, dan struktur serupa	
Persegi	0.90
Segi enam	0.95
Segi delapan	1.0
Bundar	1.0
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat	0.85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0.85
Rangka batang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0.85
Semua penampang lainnya	0.95

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 27.1.5 beban angin yang digunakan untuk bangunan gedung tertutup atau tertutup sebagian tidak boleh lebih kecil dari 0.77 kN/m^2 dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung dan 0.38 kN/m^2 dikalikan dengan luas atap bangunan gedung yang terproyeksi pada bidang vertikal tegak lurus terhadap arah angin yang diasumsikan.

2.6.1.4.4 Kategori Kekerasan Permukaan

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.7 untuk setiap arah angin yang diperhitungkan, eksposur arah melawan angin didasarkan pada kekerasan permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun. Adapun kategori kekasaran permukaan adalah sebagai berikut:

1. 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.
2. Kekasaran permukaan C: dataran terbuka dengan penghalang yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 9.1 m, mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.

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

2.6.1.4.5 Faktor Topografi (K_{zt})

Bentuk topografi memengaruhi kecepatan angin dan berpengaruh signifikan terhadap besarnya beban angin pada bangunan karena. Kondisi topografi khusus, seperti bukit atau tebing, dapat meningkatkan beban angin sesuai dengan SNI 1727-2020 Pasal 26.8. Efek peningkatan kecepatan angin harus dimasukkan dalam perhitungan beban angin desain dengan menggunakan faktor K_{zt} .

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (2.78)$$

Dimana,

K_1 : Faktor untuk memperhitungkan bentuk fitur topografis dan pengaruh peningkatan kecepatan maksimum.

K_2 : Faktor untuk memperhitungkan reduksi dalam peningkatan kecepatan sehubungan dengan jarak ke sisi angin datang atau ke sisi angin pergi dari puncak.

K_3 : Faktor untuk memperhitungkan reduksi dalam peningkatan kecepatan sehubungan dengan ketinggian di atas elevasi kawasan setempat.

Nilai K_1 , K_2 , K_3 disesuaikan dengan kondisi topografi daerah sekitar bangunan. Untuk daerah yang tidak berdekatan dengan bukit, tebing atau kondisi topografi khusus lainnya maka nilai $K_{zt} = 1$.

2.6.1.4.6 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Faktor elevasi permukaan tanah digunakan untuk menyesuaikan densitas udara, dimana untuk semua elevasi, boleh diambil nilai $K_e = 1$.

2.6.1.4.7 Efek Hembusan Angin (G)

Faktor hembusan angin untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil sebesar 0.85.

2.6.1.4.8 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan (k_z)

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.10.1 koefisien eksposur tekanan kecepatan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$K_z = 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha}, \text{ untuk } 4.6 \text{ m} \leq z \leq z_g \quad (2.79)$$

$$K_z = 2.01 \left(\frac{15}{z_g} \right)^{2/\alpha}, \text{ untuk } z < 4.6 \text{ m} \quad (2.80)$$

Dimana nilai α dan z_g dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Koefiseien eksposur tekanan kecepatan, K_h dan K_z

Ketinggian di atas permukaan tanah	Eksposur		
m	B	C	D
0 – 4.6	0.57 (0.70) ^a	0.85	1.03
6.1	0.62 (0.70) ^a	0.9	1.08
7.6	0.66 (0.70) ^a	0.94	1.12
9.1	0.7	0.98	1.16
12.2	0.76	1.04	1.22
15.2	0.81	1.09	1.27
18.3	0.85	1.13	1.31
21.3	0.89	1.17	1.34
24.4	0.93	1.21	1.39
27.4	0.96	1.24	1.4
30.5	1	1.27	1.45
36.6	1.05	1.32	1.5
42.7	1.09	1.36	1.54
48.8	1.13	1.4	1.58
54.9	1.17	1.44	1.61

Ketinggian di atas permukaan tanah	Eksposur		
61	1.2	1.47	1.64
76.2	1.27	1.53	1.69
91.4	1.33	1.58	1.73
106.7	1.41	1.64	1.78
121.9	1.42	1.67	1.82
137.2	1.52	1.73	1.86
152.4	1.56	1.77	1.89
Gunakan 0.70 pada pasal 28, Eksposur B apabila $z < 9.1 m$			

2.6.1.4.9 Tekanan Kecepatan (q_z)

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.10.2 tekanan kecepatan yang dievaluasi pada ketinggian z di atas permukaan tanah dihitung dengan persamaan berikut:

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dK_eV^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2.81)$$

Dimana,

K_z : Koefisien eksposur tekanan kecepatan.

K_{zt} : Faktor topografi.

K_d : Faktor arah angin.

K_e : Faktor elevasi permukaan tanah.

V : Kecepatan angin dasar.

q_z : Tekanan kecepatan pada ketinggian z .

2.6.1.4.10 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi}) dan Eksternal (C_p)

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.13 koefisien tekanan internal ditentukan berdasarkan

Tabel 2.15 sebagai berikut.

Tabel 2.15 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_o kurang dari terkecil $0.01A_g$ atau 0.37 m^2 dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	Sedang	-0.18 -0.18
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1.1 A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0.01A_g$ atau 0.37 m^2 dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	Tinggi	-0.55 -0.55
Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0.18 -0.18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0

Sedangkan koefisien tekanan eksternal berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 26.13 sebagaimana tercantum pada Tabel 2.16

Tabel 2.16 Koefisien Tekanan Dinding (C_p)

Permukaan	L/B	C_p
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0.8
Dinding di sisi angin pergi	0 – 1	-0.5
	2	-0.3
	≥ 4	-0.2
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7

2.6.1.4.11 Tekanan Angin Desain (p)

Berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 27.3.1 tekanan angin desain untuk bangunan gedung pada semua ketinggian ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.82)$$

Dimana,

q : Tekanan velositas pada ketinggian z (N/m^2).

G : Faktor hembusan angin.

C_p : Koefisien tekanan eksternal.

GC_{pi} : Koefisien tekanan internal

2.6.1.4.12 Syarat Angin Desain Minimum

Beban angin yang digunakan berdasarkan SNI 1727-2020 Pasal 27.1.5 untuk bangunan gedung tertutup atau tertutup sebagian tidak boleh lebih kecil dari 0.77 kN/m^2 dikalikan dengan luas dinding bangunan dan 0.38 kN/m^2 dikalikan dengan luas atap bangunan gedung yang terproyeksi pada bidang vertikal tegak lurus terhadap arah angin yang diasumsikan.

2.6.1.5 Beban Hidrostatik

Beban hidrostatik adalah tekanan yang diberikan oleh fluida dalam keadaan diam terhadap permukaan suatu benda. Beban ini dipengaruhi oleh kedalaman fluida, densitas fluida, dan percepatan gravitasi. Beban hidrostatik dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P = m \times g \quad (2.83)$$

$$m = \rho \times V \quad (2.84)$$

Dimana,

P : Beban hidrostatik (N)

m : Massa zat cair (kg)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

ρ : Massa jenis zat cair (kg/m^3)

V : Volume zat cair (m^3)

2.6.2 Beban Dinamik

Beban dinamik adalah beban yang berubah seiring waktu dan dapat menyebabkan perubahan mendadak dalam gaya yang bekerja pada struktur. Beban

ini sering kali lebih kompleks untuk dianalisis dibandingkan dengan beban statis karena sifatnya yang bervariasi dan dapat menyebabkan respon dinamis pada struktur.

2.6.2.1 Beban Gempa

Beban gempa adalah beban yang dihasilkan oleh getaran tanah akibat aktivitas seismik, seperti gempa bumi. Beban ini dapat menyebabkan gaya lateral yang signifikan pada struktur, yang dapat mengakibatkan kerusakan dan keruntuhan jika tidak dirancang dengan baik. Beban gempa bervariasi tergantung pada lokasi geografis, kedalaman sumber gempa, dan karakteristik geologi daerah tersebut.

Beban gempa dapat dianalisis secara statis dan dinamis. Analisa statik didasarkan oleh gaya geser pada dasar struktur rancangan, dimana gaya geser didistribusikan ke seluruh tinggi bangunan tersebut. Sedangkan analisa dinamik ditentukan dengan analisis respon spektrum dan analisis riwayat waktu.

2.6.2.1.1 Faktor Keutamaan Gempa dan Kategori Risiko Struktur Bangunan

Kategori risiko struktur bangunan adalah klasifikasi bangunan berdasarkan dampak yang ditimbulkan jika bangunan mengalami kegagalan struktural akibat bencana, seperti gempa bumi (Tabel 2.17). Klasifikasi ini mempertimbangkan faktor seperti jumlah jiwa yang berisiko, fungsi bangunan, dan potensi dampak ekonomi atau sosial.

Tabel 2.17 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan • Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan • Rumah toko dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Gedung apartemen/rumah susun • Pusat perbelanjaan/mall • Bangunan industri • Fasilitas manufaktur 	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertunjukan • Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Panti asuhan • Penjara • Bangunan untuk orang jompo 	III
<p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap masyarakat di hari-hari biasa jika terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat penyimpanan hasil bahan baku • Fasilitas pengolahan limbah • Pusat telekomunikasi • Pusat transportasi 	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak terbatas pada bangunan produksi, proses manufaktur, penyimpanan, pengumpulan atau distribusi bahan berbahaya yang bersifat mudah meledak, bahan berbahaya, limbah berbahaya, atau memiliki potensi bahaya tinggi bagi masyarakat) yang dirancang untuk beroperasi dalam kondisi darurat, fasilitas bantuan bagi masyarakat, dan fasilitas yang menyimpan dan/atau memproses limbah bahan bahaya yang tidak terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat • Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat 	IV

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV	

Faktor keutamaan gempa adalah angka yang menunjukkan tingkat kepentingan suatu bangunan dalam menahan gempa (Tabel 2.18). Faktor ini digunakan dalam perhitungan beban gempa untuk memastikan bangunan dengan fungsi vital atau berisiko tinggi mendapatkan perlindungan lebih besar.

Tabel 2.18 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa (I_e)
I atau II	1.0
III	1.25
IV	1.50

2.6.2.1.2 Kelas Situs

Tipe kelas situs berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 5.3 sesuai dengan Tabel 2.19.

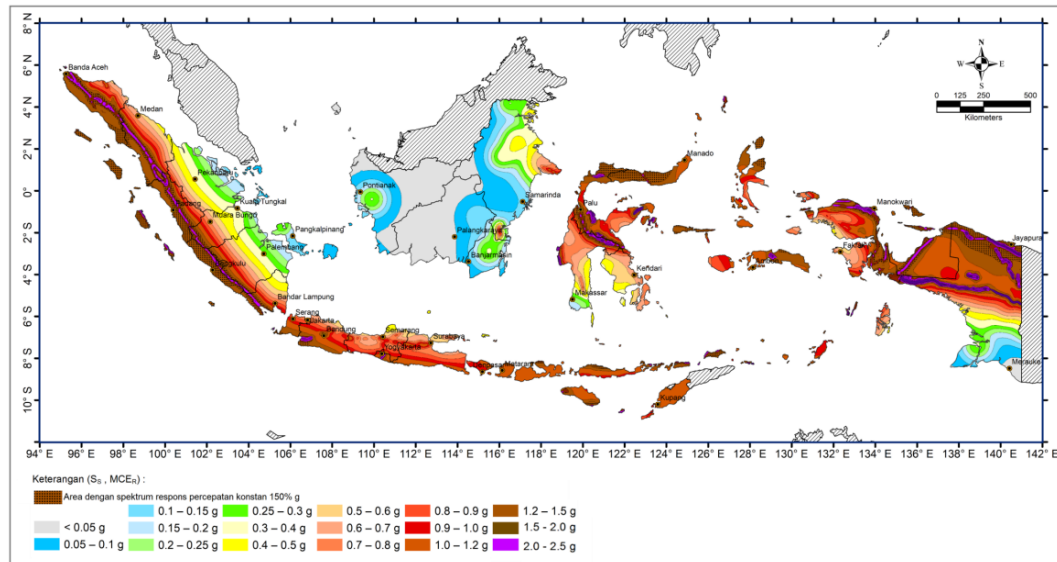
Tabel 2.19 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100

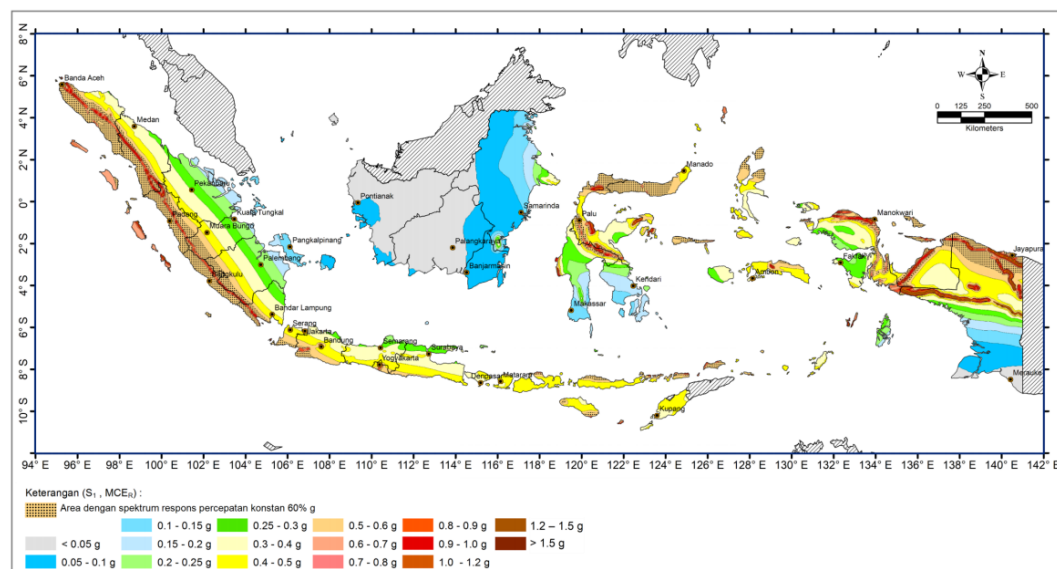
Kelas Situs	$\overline{V_s}$ (m/detik)	\overline{N} atau $\overline{N_{ch}}$	$\overline{S_u}$ (kPa)
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralisir $\overline{S_u} < 25 \text{ kPa}$ 		
SF (tanah khusus, membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 \text{ m}$) • Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5 \text{ m}$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$) • Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35 \text{ m}$ dengan $\overline{S_u} < 50 \text{ kPa}$ 		

2.6.2.1.3 Parameter Percepatan Gempa Batuan Dasar

Parameter Percepatan Gempa Batuan Dasar adalah nilai percepatan gempa yang terjadi pada lapisan batuan dasar sebelum dipengaruhi oleh kondisi tanah di atasnya. Parameter ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan respons seismik suatu lokasi. Parameter untuk percepatan gempa batuan dasar yaitu S_s (untuk periode 0,2 detik) dan S_1 (untuk periode 1 detik), yang diperoleh dari peta seismik (Gambar 2.12 dan Gambar 2.13) atau aplikasi desain spektra.



Gambar 2.12 Peta Parameter S_s
(Sumber: SNI 1726-2019)



Gambar 2.13 Peta Parameter S_i
(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.2.1.4 Koefisien Situs

Koefisien Situs adalah faktor koreksi yang digunakan untuk menyesuaikan parameter percepatan gempa batuan dasar dengan kondisi tanah setempat. Koefisien ini memperhitungkan pengaruh karakteristik tanah terhadap respons seismik suatu lokasi dan digunakan dalam perencanaan struktur tahan gempa.

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.2 untuk penentuan respon spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0.2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran pendek (F_a) (Tabel 2.20) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v) (Tabel 2.21).

Tabel 2.20 Koefisien Situs (F_a)

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Target (MCE_R) Terpetakan pada Periode pendek, $T = 0.2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
SA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
SC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
SD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
SE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
SF	$SS^{(a)}$					

Tabel 2.21 Koefisien Situs (F_v)

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Target (MCE_R) Terpetakan pada Periode 1 Detik, S_1					
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.2$	$S_s = 0.3$	$S_s = 0.4$	$S_s = 0.5$	$S_s \geq 0.6$
SA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
SD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
SE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	1.0
SF	$SS^{(a)}$					

2.6.2.1.5 Parameter Spektrum Respon Percepatan

Parameter respon spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.2 ditentukan dengan persamaan berikut:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.85)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.86)$$

Dimana,

S_s : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek.

S_1 : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik.

2.6.2.1.6 Parameter Percepatan Spektral Desain

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.3 parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan periode 1 detik (S_{D1}) ditentukan melalui persamaan berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.87)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.88)$$

Jika digunakan prosedur desain yang disederhanakan, maka nilai S_{DS} harus ditentukan 0 dan nilai S_{D1} tidak perlu ditentukan.

2.6.2.1.7 Kategori Desain Seismik

Kategori Desain Seismik adalah klasifikasi suatu bangunan atau struktur berdasarkan tingkat risiko dan lokasi seismiknya untuk menentukan persyaratan desain tahan gempa. Kategori ini ditentukan berdasarkan parameter respons percepatan dan kategori risiko dan dipengaruhi oleh jenis tanah, fungsi bangunan, dan level bahaya gempa. Kategori desain seismik berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.5 tercantum pada Tabel 2.22 dan Tabel 2.23.

Tabel 2.22 Kategori Desain Seismik Berdasarkan respon Percepatan pada Periode Pendek

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0.167$	A	A
$0.167 \leq S_{DS} < 0.33$	B	C
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	C	D
$0.50 \leq S_{DS}$	D	D

Tabel 2.23 Kategori Desain Seismik Berdasarkan respon Percepatan pada Periode 1 Detik

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0.067$	A	A
$0.067 \leq S_{D1} < 0.133$	B	C
$0.133 \leq S_{D1} < 0.20$	C	D
$0.20 \leq S_{D1}$	D	D

2.6.2.1.8 Periode Struktur

Periode struktur adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran alami saat mengalami gangguan, seperti gempa bumi atau angin kencang. Periode struktur biasanya dinyatakan dalam detik (s) dan bergantung pada berbagai faktor, seperti tinggi bangunan, material, sistem struktur, serta massa dan kekakuan bangunan. Batas periode fundamental struktur (T) berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.2 adalah sebagai berikut:

$$T = C_u \times T_a \quad (2.89)$$

Dimana,

T : Periode fundamental (detik)

C_u : Koefisien periode batas atas (

Tabel 2.24)

T_a : Periode pendekatan fundamental (detik)

Tabel 2.24 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respon spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
≥ 0.4	1.4
0.3	1.4
0.2	1.5
0.15	1.6
≤ 0.1	1.7

Sedangkan periode fundamental pendekatan (T_a) berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.2 dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.90)$$

Dimana,

h_n : ketinggian struktur (m)

C_t dan x ditentukan berdasarkan tabel parameter pendekatan C_t dan x

Tabel 2.25 Nilai Parameter Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100% gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
- Rangka baja pemikul momen	0.0724	0.8

Tipe Struktur	C_t	x
- Rangka beton pemikul momen	0.0466	0.9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0.0731	0.75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0.0731	0.75
Semua sistem struktur lainnya	0.0488	0.75

2.6.2.1.9 Desain Respon Struktur

Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 6.4 kurva respon spektrum desain harus dikembangkan dengan mengacu pada Gambar 2.14 dan mengikuti ketentuan berikut:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , respon percepatan desain (S_a) diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.91)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain (S_a), sama dengan (S_{DS})
3. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain (S_a), diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.92)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain (S_a), diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.93)$$

Dimana,

S_{DS} : Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek

S_{D1} : Parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik

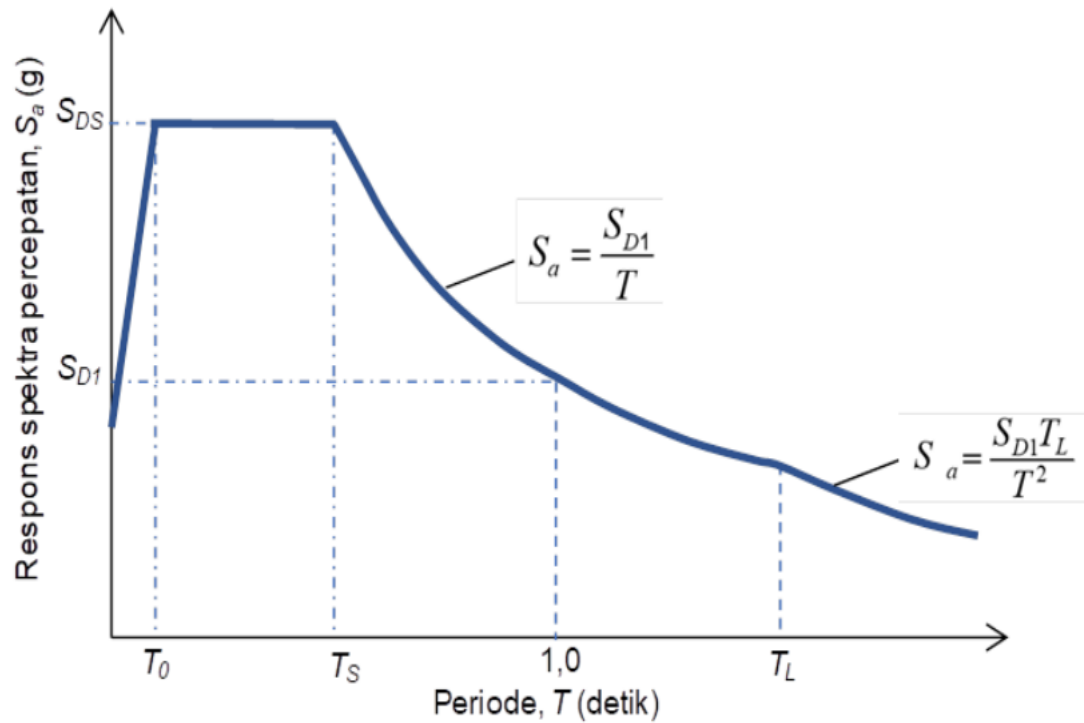
T : Periode getar fundamental struktur

Nilai ketentuan T_0 , T_s , dan T_L adalah sebagai berikut:

$$T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.94)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.95)$$

T_L = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Spektrum Respon Desain

(Sumber: SNI 1726-2019)

2.6.2.1.10 Koefisien Rancangan

Nilai koefisien rancangan untuk sistem rangka pemikul momen yang diatur pada SNI 1726-2019 Pasal 7.2.2 sebagaimana tercantum pada Tabel 2.26 berikut:

Tabel 2.26 Faktor R , C_d , dan Ω_o untuk sistem pemikul gaya seismik

No	Sistem pemikul gaya seismik	R ^a	Ωo	C _d ^c	Batasan sistem struktur dan Batasan tinggi struktur (h _n) (m) ^d				
					Kategori desain seismik				
					B	C	D ^e	E ^e	F
C.	Sistem Rangka Pemikul Momen								
1	Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
2	Rangka barang baja pemikul momen khusus	7	3	5.5	TB	TB	48	30	TI
3	Rangka baja pemikul momen menengah	4.5	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4	Rangka baja pemikul momen biasa	3.5	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
5	Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
6	Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4.5	TB	TB	TI	TI	TI
7	Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2.5	TB	TI	TI	TI	TI
8	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
9	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4.5	TB	TB	TI	TI	TI
10	Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5.5	48	48	30	TI	TI

No	Sistem pemikul gaya seismik	R^a	Ω_0	C_d^c	Batasan sistem struktur dan Batasan tinggi struktur (h_n) (m) ^d				
					Kategori desain seismik				
					B	C	D ^e	E ^e	F
11	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2.5	TB	TI	TI	TI	TI
12	Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan bautan	3.5	3	3	10	10	10	10	10

2.6.2.1.11 Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu adalah metode dalam rekayasa gempa yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban gempa berdasarkan riwayat waktu percepatan tanah yang dicatat atau disintesis. Metode ini melibatkan integrasi langsung dari persamaan gerak struktur dalam domain waktu, sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat tentang perilaku dinamis bangunan.

2.6.2.2 Beban Hidrodinamik

2.6.2.2.1 Penelitian Mengenai TLD

TLD baik itu berupa *Tuned Sloshing Dampers* (TSDs) dan *Tuned Liquid Column Dampers* (TLCDs) adalah jenis peredam yang populer sejak digunakan pertama kali pada tahun 1988. TLD dianggap cukup praktis, karena hanya dengan menambahkan sedikit massa atau bahkan tidak sama sekali, sistem ini dapat mengurangi respon percepatan hingga 1/2 sampai 1/3 dari respon awal (Kareem dkk., 1999).

Bikram Rana dkk (2008) melakukan penelitian untuk mempelajari efektivitas TLD dalam mengurangi getaran seismik pada sebuah bangunan ketika dikenai gaya sinusoidal horizontal untuk mengkaji beberapa parameter TLD yang dapat mempengaruhi kinerjanya. Berdasarkan analisis, TLD dapat digunakan secara efektif untuk mengurangi respon struktur selama gempa bumi. Pengurangan

respon sebesar 45% - 50% dapat tercapai ketika frekuensi gempa cocok dengan frekuensi alami bangunan. Rasio massa yang optimal untuk desain TLD ditentukan sekitar 2%. Efektivitas TLD menurun seiring dengan meningkatnya rasio kedalaman, rasio 0.2 – 0.3 dianggap paling optimal. *Tuning Rasio* sangat penting dalam desain TLD yaitu sebesar 98% dari frekuensi alami struktur. Efek redaman dari TLD akan lebih terlihat pada bangunan tinggi dengan banyak lantai daripada bangunan pendek. TLD lebih praktis dan ekonomis untuk bangunan tinggi.

Chang & Gu (1999) mengkaji efektivitas *rectangular Tuned Liquid Dampers* (TLD) dalam mereduksi getaran gedung tinggi akibat eksitasi pusaran angin. Melalui uji terowongan angin pada model bangunan skala kecil dengan variasi dimensi TLD dan ketinggian air, ditemukan bahwa TLD mampu menurunkan simpangan RMS puncak hingga sekitar 1/6 dari kondisi tanpa TLD pada rasio massa umum 2.3%. Kinerja terbaik dicapai saat frekuensi TLD berada pada 0.9–1.0 kali frekuensi alami bangunan, yang selaras dengan prediksi analitis.

Ocak dkk (2022) mengkaji optimasi *Tuned Liquid Damper* (TLD) untuk berbagai tinggi struktur dan jenis cairan. Hasilnya menunjukkan bahwa cairan dengan viskositas rendah seperti aseton cocok untuk struktur satu lantai, sementara struktur yang lebih tinggi memerlukan cairan dengan viskositas dan densitas lebih tinggi. Pada struktur empat puluh lantai, merkuri dengan densitas tertinggi menjadi cairan optimal. Optimasi TLD terbukti mampu mengurangi simpangan dan percepatan struktur secara signifikan, dengan kinerja yang tetap stabil meskipun terjadi variasi massa struktur. Penelitian ini menggunakan mass ratio sebesar 5%, dan menyimpulkan bahwa pemilihan cairan TLD sebaiknya disesuaikan dengan massa struktur.

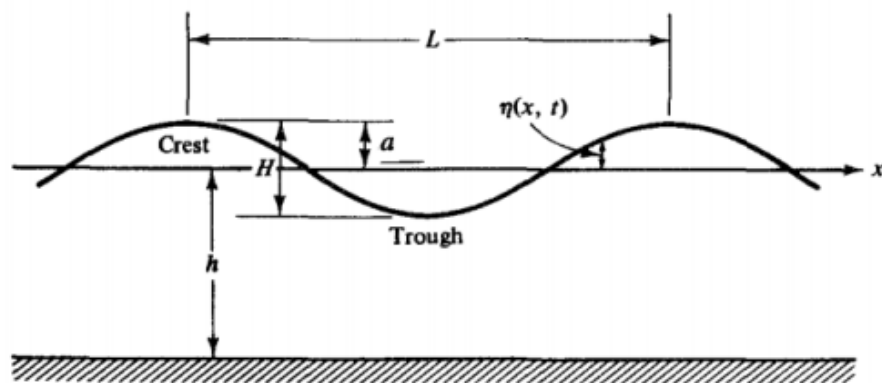
Ramdani dkk (2023a) melakukan simulasi numerik menggunakan aplikasi DualSPHysics dengan reservoir berbentuk kotak berukuran 200 mm, serta lebar 50 mm, 75 mm, dan 100 mm. Reservoir ini diberikan dengan gaya lateral sinusoidal pada berbagai frekuensi untuk menghasilkan gaya maksimum pada dinding reservoir. Selain itu, model struktur baja tiga lantai dengan dimensi 500 x 500 mm dan tinggi 1200 mm diuji dalam kondisi getaran bebas dengan reservoir berbentuk kotak. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa pada rasio d/L hingga 0.144, gaya resultan maksimum masih meningkat. Dalam uji getaran bebas model

eksperimental, rasio redaman (ξ) optimal ditunjukkan oleh penurunan amplitudo lateral model struktur pada d/L antara 0.2 dan 0.4, serta sekitar frekuensi alami struktur, yaitu 2.2439 Hz. Efektivitas peredaman dicapai ketika massa air berada dalam kisaran 4–8% dari total massa struktur, dengan rasio dimensi bak (d/L) antara 0,2 hingga 0,4 (Ramdani dkk., 2023b)

2.6.2.2.2 Fenomena *Sloshing*

Sloshing adalah fenomena pergerakan cairan secara bergelombang di dalam suatu wadah akibat gaya eksternal, seperti gempa bumi, angin, atau percepatan kendaraan. Fenomena ini terjadi ketika fluida di dalam tangki atau wadah mengalami osilasi (gerakan naik-turun atau bergoyang) akibat perpindahan energi dari luar. Karakteristik gelombang *sloshing* dipengaruhi oleh bentuk bak air, kedalaman air, dan besaran gempa yang diterima struktur.

Teori Gelombang *Airy* digunakan untuk mengestimasi karakteristik gelombang air dan efeknya yang merupakan pendekatan dari gelombang sebenarnya yang terjadi (Gambar 2.15).



Gambar 2.15 Skema Gelombang Airy
(Sumber: Dean & Dalrymple, 1991)

Besar frekuensi natural dari gerakan *sloshing* berdasarkan teori gelombang airy didefinisikan dengan pendekatan berikut:

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tan h \cdot k \cdot h \quad (2.96)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.97)$$

Dimana,

k : *Angular wave number* (rad/m)

h : Kedalaman air

λ : Panjang satu gelombang (m)

Pendekatan lain mengenai frekuensi *sloshing* diberikan dengan menganggap bagian air yang berosilasi hanya pada bagian tertentu dari air pada tangki. Bagian air yang mengalami *sloshing* dinamakan bagian air *convective*.

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = 2\pi \frac{\sqrt{L}}{\lambda} \quad (2.98)$$

$$\lambda = \sqrt{3.16 g \tanh \left[3.16 \left(\frac{h}{L} \right) \right]} \quad (2.99)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3.16 g \frac{\tanh \left[3.16 \left(\frac{h}{L} \right) \right]}{L}} \quad (2.100)$$

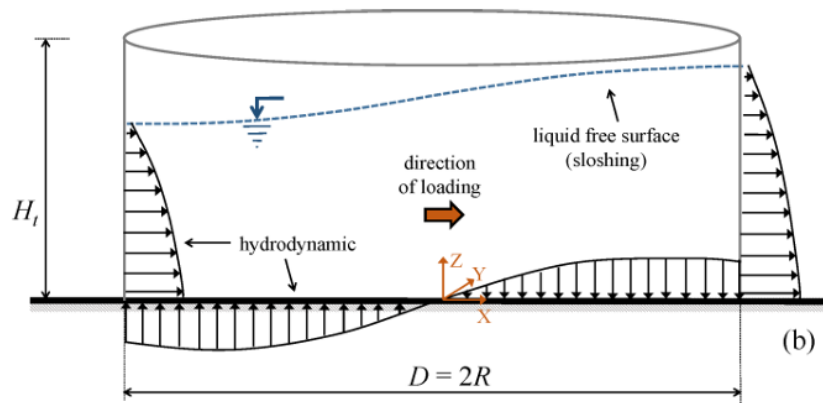
Dimana,

T_c : Periode *convective*

L : Panjang atau lebar tangki

H : Kedalaman air tangki

Pada beberapa penelitian, bak air pada bangunan diatur memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi alami struktur dapat mengurangi perpindahan yang terjadi pada struktur ketika dibebani beban gempa. Air dapat menyerap energi vibrasi yang dialami gedung dengan gerakan *sloshing* yang menyebabkan air memberikan tekanan dan tarikan pada dinding tangki seperti pada Gambar 2.16.

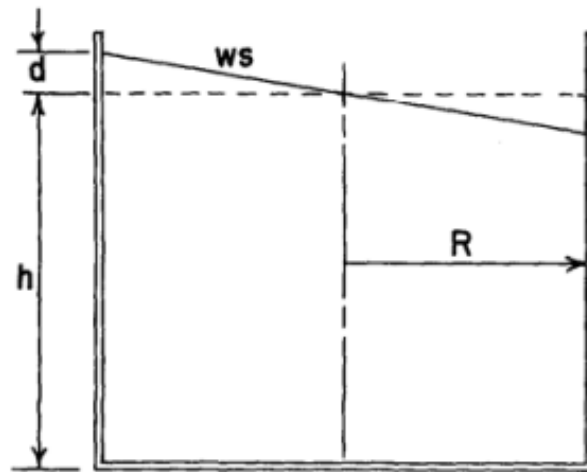


Gambar 2.16 Beban Hidrodinamik Ekuivalen

(Sumber: (Bakalis & Karamanos, 2021))

2.6.2.2.3 Spring Mass System

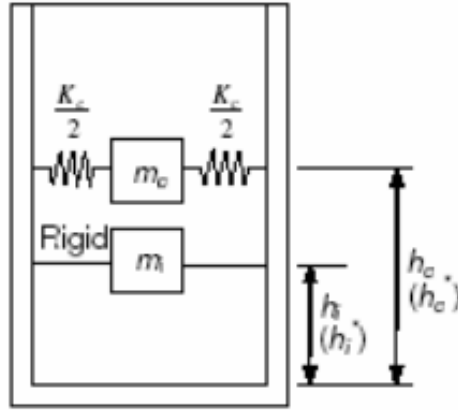
Beban hidrodinamik adalah beban yang timbul akibat pergerakan air, terutama saat terjadi gempa. Ketika gaya lateral bekerja pada bak berisi air, percepatan horizontal menyebabkan pergerakan air yang terbagi menjadi dua bagian (Gambar 2.17). Air di bagian bawah bergerak bersama bak dengan percepatan yang sama, seolah-olah terhubung kaku dengan dasar bak. Sedangkan air di bagian atas bergerak tidak selaras dengan bak maupun air di bawahnya, tetapi mengalami gerakan collinear yang disebut sloshing. Fenomena sloshing ini menggambarkan osilasi permukaan air akibat gangguan eksternal, seperti gempa, yang mempengaruhi sistem dinamik dalam bak.



Gambar 2.17 Sistem Dinamik Ekuivalen untuk Tangki Air

(Sumber: Housner, 1963)

Untuk memudahkan analisis, pergerakan air dalam tangki yang terkena beban lateral dapat diidealisasikan sebagai sistem pegas dan massa terpusat. Model ini membagi pergerakan air menjadi dua bagian. *Impulsive Mass* yaitu bagian air yang bergerak bersama dinding bak, seolah-olah terhubung secara kaku dengan dinding bak. *Convective Mass* yaitu bagian air yang mengalami gerakan osilasi atau sloshing, yang diidealisasikan terhubung dengan dinding bak melalui pegas (Gambar 2.18).



Gambar 2.18 *Spring Mass System*

(Sumber: Housner, 1963)

Berdasarkan ACI 350.3-06 besar masing-masing parameter dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\frac{w_i}{w_L} = \frac{\tanh\left(0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)\right)}{0.866\left(\frac{L}{H_L}\right)} \quad 2.101$$

$$\frac{w_c}{w_L} = 0.264 \left(\frac{L}{H_L}\right) \tanh\left(3.06 \left(\frac{H_L}{L}\right)\right) \quad 2.102$$

$$\frac{h_i}{H_L} = 0.375 \quad 2.103$$

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left(3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right) - 1}{3.16\left(\frac{H_L}{L}\right) \sin\left(3.16\left(\frac{H_L}{L}\right)\right)} \quad 2.104$$

$$K_c = \omega_c^2 w_c = \left(\frac{2\pi}{T_c}\right)^2 w_c \quad 2.105$$

2.7 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan adalah perpaduan berbagai jenis beban yang bekerja pada suatu struktur untuk memastikan keamanan dan kekuatannya. Dalam perencanaan struktur, kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1726-2019

2.7.1 Kombinasi Beban Ultimit

Kombinasi pembebanan ultimit adalah sebagai berikut:

1. $1.4D$
2. $1.2D + 1.6L + 0.5 (L_r \text{ atau } R)$
3. $1.2D + 1.6 (L_r \text{ atau } R) + (1.0L \text{ atau } 0.5W)$
4. $1.2D + 1.0W + 1.0L + 0.5 (L_r \text{ atau } R)$
5. $0.9D + 1.0W$

Kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik adalah sebagai berikut:

6. $1.2D + E_v + E_h + L$
7. $0.9D - E_v + E_h$

Dimana,

$$E_h = \rho \cdot Q_E \text{ dan } E_v = 0.2 S_{DS} D$$

2.7.2 Kombinasi Beban Layan

Kombinasi pembebanan ultimit adalah sebagai berikut:

1. D
2. $D + L$
3. $D + (L_r \text{ atau } R)$
4. $D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ atau } R)$
5. $D + 0.6W$
6. $D + 0.75(0.6W) + 0.75L + 0.75(L_r \text{ atau } R)$
7. $0.6D + 0.6W$

Kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik nominal adalah sebagai berikut:

$$8. D + 0.7E_v + 0.7E_h$$

$$9. D + 0.525E_v + 0.525E_h + 0.75L$$

$$10. 0.6D - 0.7E_v + 0.7E_h$$

Dimana,

$$E_h = \rho \cdot Q_E \text{ dan } E_v = 0.2 S_{DS} D$$

Kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik kuat adalah sebagai berikut:

$$11. D + 0.7E_v + 0.7E_{mh}$$

$$12. D + 0.525E_v + 0.525E_{mh} + 0.75L$$

$$13. 0.6D - 0.7E_v + 0.7E_{mh}$$

Dimana,

$$E_h = \Omega_o \cdot Q_E \text{ dan } E_v = 0.2 S_{DS} D$$

2.8 Evaluasi Perilaku Struktur

2.8.1 Jumlah Ragam

Jumlah ragam mengacu pada jumlah mode getar yang dipertimbangkan untuk menggambarkan respons dinamik suatu sistem terhadap beban dinamis, seperti gempa atau angin. Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.1 analisis untuk menentukan ragam getar alami struktur harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100% dari massa struktur. Sebagai alternatif, analisis diizinkan untuk memasukan jumlah ragam yang minimum untuk mencapai massa ragam terkombinasi paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing-masing arah horizontal ortogonal dari respon yang ditinjau oleh model.

2.8.2 Ketidakberaturan Struktur

Ketidakberaturan struktur adalah kondisi di mana suatu bangunan memiliki geometri, distribusi massa, atau kekakuan yang tidak seragam, sehingga responsnya terhadap beban (terutama gempa) menjadi lebih kompleks. Ketidakberaturan

struktur diklasifikasikan menjadi dua yaitu, ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal.

Ketidakberaturan horizontal terjadi ketika terdapat perbedaan bentuk, dimensi, atau kekakuan di sepanjang bidang horizontal (denah bangunan) sebagaimana diatur pada SNI 1726-2019 Pasal 7.3.2.1 (Tabel 2.27).

Tabel 2.27 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

Nomor	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan
1a	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1.0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap sumbu adalah lebih dari 1.2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku.
1b	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1.0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1.4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku.
2	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15 % dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.
3	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau bukaan yang lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang berdekatan, atau jika daerah efektif diafragma efektif lebih dari 50 % dari tingkat ke tingkat selanjutnya.
4	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan

Nomor	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan
	pemindahan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.
5	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.

. Ketidakberaturan vertikal terjadi ketika terdapat perubahan signifikan dalam kekakuan, kekuatan, atau massa bangunan sepanjang ketinggian sebagaimana diatur pada SNI 1726-2019 Pasal 7.3.2.2 (Tabel 2.28)

Tabel 2.28 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

Nomor	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan
1a	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.
1b	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.
2	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak dihitung.
3	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat di dekatnya.
4	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang

Nomor	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan
	elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.
5a	Ketidakteraturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau
5b	Ketidakteraturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu Tingkat kurang dari 65% kekuatan lateral Tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser Tingkat pada arah yang ditinjau.

2.8.3 Skala Gempa

Gaya geser dasar dinamik yaitu hasil analisis respon spektrum dan riwayat waktu harus lebih besar dari 100% gaya geser statiknya. Jika gaya geser dasar dinamik lebih kecil dari gaya geser statiknya, maka perlu dilakukan penyesuaian.

$$\text{Scale} - x = \frac{V}{V_{dx}} \quad 2.106$$

$$\text{Scale} - y = \frac{V}{V_{dy}} \quad 2.107$$

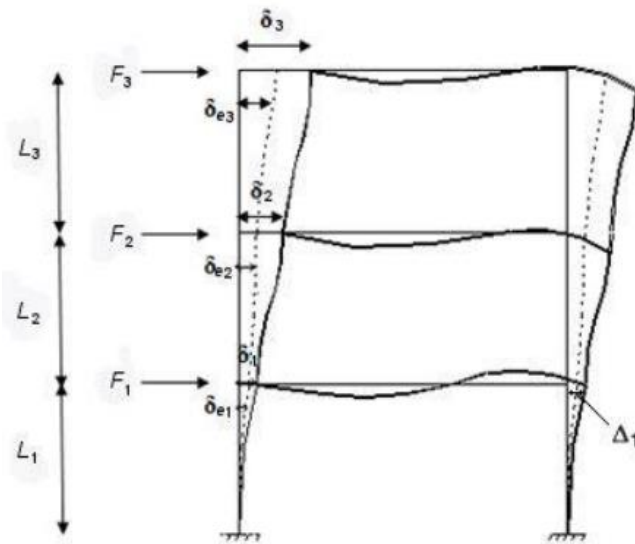
$$\text{Faktor Skala } x = \left(g \times \frac{I_e}{R}\right) \times \left(\frac{V}{V_{dx}}\right) \quad 2.108$$

$$\text{Faktor Skala } y = \left(g \times \frac{I_e}{R}\right) \times \left(\frac{V}{V_{dy}}\right) \quad 2.109$$

2.8.4 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat adalah perpindahan lateral relatif antara dua tingkat bangunan yang diukur dari lantai di bawahnya. Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.6 penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai

perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau (Gambar 2.19).



Gambar 2.19 Penentuan Simpangan Antar Tingkat
(Sumber: SNI 1726-2019)

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

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_c} \quad 2.110$$

Dimana,

C_d : faktor pembesaran simpang lateral

δ_{xe} : simpangan di tingkat- x yang disyaratkan

I_c : faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan 0

Displacement yang didapatkan dari SAP2000 tidak boleh melebihi $H/240$ (Imanuel dkk., 2019). Simpangan antar tingkat desain tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin sebagaimana tercantum dalam SNI 1726-2019 Pasal 7.12.1 (Tabel 2.29).

Tabel 2.29 Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0.025h_{sx}^c$	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$	$0.010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$	$0.007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0.020h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.010h_{sx}$

2.8.5 Pengaruh P-Delta

Analisis terhadap pengaruh **P-delta** perlu dilakukan untuk mengevaluasi efek gaya aksial terhadap perpindahan lateral struktur, yang dapat meningkatkan simpangan antar tingkat dan memengaruhi keseimbangan system. Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.8.7, pengaruh P-delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas (θ) sama dengan atau kurang dari 0.1.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \quad 2.111$$

Dimana,

P_x : beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x, (kN)

Δ : simpangan antar tingkat desain

I_e : faktor keutamaan gempa

V_x : gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan $x-1$ (kN)

h_{sx} : tinggi tingkat di bawah tingkat x

C_d : faktor pembesaran defleksi

Koefisien stabilitas tidak boleh melebihi θ_{\max} yang ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_{\max} = \frac{0.5}{\beta C_d} \quad 2.112$$

Dimana β adalah rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser untuk tingkat antara tingkat x dan $x-1$.