

2 LANDASAN TEORI

2.1 Kolam Renang

Kolam renang merupakan fasilitas umum yang digunakan untuk berenang, rekreasi, atau olahraga air lainnya dalam bentuk konstruksi berupa kolam yang memiliki sistem pengolahan air dan dilengkapi dengan fasilitas kenyamanan dan keamanan baik di luar maupun di dalam bangunan (Menteri Kesehatan Republik Indonesia, 2017). Dengan keterbatasan lahan khususnya pada gedung bertingkat, kini pemanfaatan lantai teratas gedung sebagai kolam renang sudah banyak diterapkan pada gedung-gedung bertingkat di Indonesia bahkan di dunia. Selain sebagai solusi dari keterbatasan lahan, dengan adanya kolam renang pada lantai teratas gedung bertingkat tersebut dapat menarik perhatian dan menambah nilai jual dari gedung tersebut.

Kolam renang ini merupakan konstruksi buatan yang harus direncanakan dengan matang. Selain itu, dengan penambahan kolam renang ini dapat menimbulkan massa yang sangat besar yang diakibatkan oleh air terutama pada lantai atap gedung tentunya harus diberi perhatian khusus (Rahmawati & Pangestuti, 2022).

Berikut merupakan contoh gedung bertingkat dengan penerapan kolam renang pada lantai atasnya.



Gambar 2.1 *Sky Pool* Hotel Indonesia Kempinski Jakarta
(Sumber: Hotel Indonesia Kempinski Jakarta, 2024)



Gambar 2.2 *Rooftop Pool* 137 Pillars Hotels Bangkok
(Sumber: 137 Pillars Hotel, 2024)



Gambar 2.3 *Rooftop Pool* Morrissey Hotel Residence Indonesia
(Sumber: Morrissey Hotel Residence Indonesia, 2024)

2.1.1 Jenis Kolam Renang

Berdasarkan pemakaiannya, kolam renang dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu sebagai berikut:

1. *Private swimming pool*, yaitu kolam renang milik perorangan yang biasanya terletak atau dimiliki oleh rumah perseorangan.
2. *Semi private swimming pool*, yaitu kolam renang yang dapat digunakan oleh sekelompok orang tertentu, biasanya hanya dapat diakses oleh tamu hotel, penghuni apartemen, atau pelanggan fasilitas tertentu. Kolam renang jenis ini tidak terbuka untuk umum seperti kolam renang publik namun tidak juga sepenuhnya seperti kolam renang pribadi.

3. *Public swimming pool*, yaitu kolam renang yang diperuntukkan untuk umum.

Sedangkan jenis kolam renang berdasarkan letaknya dapat dibedakan menjadi 2 jenis, di antaranya:

1. *Outdoor swimming pool*, yaitu kolam renang yang terletak di tempat terbuka. Biasanya kolam renang jenis ini diperuntukkan untuk umum atau semi umum dan biasanya berada di perkotaan seperti pada hotel, apartemen, sekolah, atau perumahan.
2. *Indoor swimming pool*, yaitu kolam renang yang terletak di tempat tertutup atau berada di dalam ruangan. Biasanya digunakan untuk perorangan dan merupakan milik pribadi di rumah perseorangan tersebut.

2.1.2 Material Kolam Renang

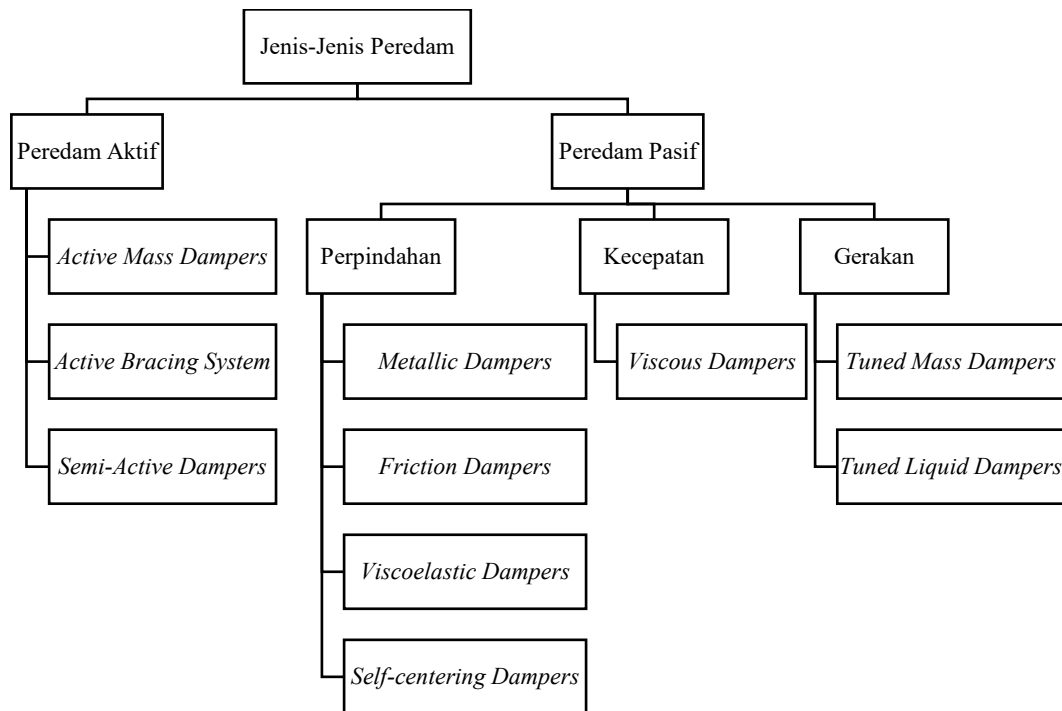
Menurut ISPSC (2021) dalam Pasal 307.2.1 tentang material, untuk kolam renang dan fasilitasnya harus menggunakan material yang tidak berbahaya bagi manusia dan lingkungan, kedap air dan tahan lama, mampu menahan tegangan desain, permukaannya halus dan mudah dibersihkan, tidak ada retakan atau sambungan kecuali sambungan struktural, permukaan yang bersentuhan langsung dengan manusia diberi *finishing* yang sedemikian rupa tidak menimbulkan bahaya seperti luka sayat, terjepit, tertusuk, atau lecet.

Material pada kolam renang yang biasanya digunakan menurut ISPSC 2021 yaitu *tile* atau lantai dengan standar ANSI A108/A118/A136.1 dan *vinyl* dengan standar ASTM D1593. Sedangkan untuk struktur kolam renang, penggunaan beton banyak digunakan karena kemudahannya dalam pembentukan dan dapat menjadi bantalan struktur yang baik dalam menahan beban air.

2.2 Peredam Struktur (*Structural Damping*)

Peredam struktur merupakan sistem atau perangkat baik aktif maupun pasif yang digunakan untuk mengurangi atau mengontrol getaran, energi, atau gangguan mekanis yang terjadi pada struktur yang diakibatkan oleh beban dinamis, seperti gempa bumi, angin, atau aktivitas manusia. Peredam ini berfungsi untuk menyerap energi kinetik atau meredam osilasi sehingga dapat meningkatkan stabilitas, kenyamanan dan meningkatkan umur struktur. Beberapa jenis peredam telah dikenal berdasarkan fungsinya, yaitu peredam aktif dan peredam pasif. Dalam

jenis peredam pasif, terdapat *Tuned Mass Damper* (TMD), dimana TMD ini memerlukan bantalan karet, pegas, *dashpot* dan komponen mekanis canggih lainnya sebagai massa untuk meredam. Sehingga memerlukan biaya yang tidak sedikit untuk mengaplikasikan TMD pada bangunan. Namun, *Tuned Liquid Damper* (TLD) menggunakan massa berupa cairan sebagai peredam sehingga dapat lebih terjangkau. Untuk jenis-jenis peredam dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Jenis-Jenis Peredam

(Sumber : Luboya, 2020)

2.2.1 Manfaat Peredaman Struktur

Peredaman struktur ini memiliki beberapa manfaat selain dapat meredam struktur, di antaranya yaitu:

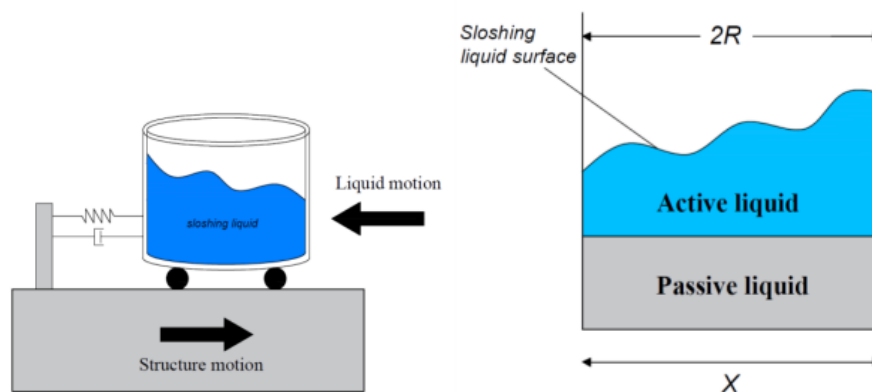
1. Mengurangi risiko kerusakan karena struktur lebih tahan terhadap getaran ekstrem.
2. Dapat meningkatkan kenyamanan dengan mengurangi osilasi pada bangunan.
3. Dapat mengefisiensikan energi dengan mengurangi kehilangan energi akibat getaran.
4. Dapat meningkatkan umur struktur dengan meminimalkan kerusakan akibat beban dinamis.

2.2.2 *Tuned Liquid Damper (TLD)*

Tuned Liquid Damper (TLD) merupakan salah satu jenis *Tuned Mass Damper (TMD)* yang berupa perangkat redaman pasif yang memanfaatkan gerakan cairan sebagai pengganti massa di dalam tangki atau wadah khusus untuk mengurangi atau menghilangkan energi getaran dari struktur. Terdapat beberapa jenis TLD yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4, dimana TLD ini dapat dikategorikan berdasarkan bentuk, kedalaman air, dan fungsinya. Penggunaan TLD sebagai peredam pada lantai teratas bangunan memiliki beberapa keunggulan seperti biaya rendah serta kemudahan pemasangan dan perawatan dibandingkan dengan sistem peredam tambahan lainnya.

2.2.3 *Parameter yang Mempengaruhi Tuned Liquid Damper (TLD)*

Dalam penelitian (Ocak dkk., 2022), Abramson menggambarkan gelombang (*sloshing*) dalam tangki silinder dengan menguji dan membuat pemodelan dengan cairan dalam tangki tersebut tidak sepenuhnya bergelombang, melainkan sebagian cairan tetap diam. Cairan yang tetap atau pasif dianggap bergerak searah dengan tangki.



Gambar 2.5 Gerakan Cairan pada Tangki

(Sumber: Ocak et al., 2022)

Chawhan (2021) memodelkan *sloshing* menggunakan massa terkonsentrasi (*lumped mass model*) pada penelitiannya, dimana efisiensi TLD menurutnya dipengaruhi oleh rasio massa, rasio kedalaman cairan, jumlah tangki dan periode alami struktur. Selain itu, Hassan dkk. (2021) menyimpulkan dari penelitiannya

bahwa berat cairan terhadap berat struktur cukup berpengaruh dalam meredam getaran.

Posisi peletakan peredam berupa TLD ini juga cukup memengaruhi keefektifan dalam meredam suatu getaran struktur. Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dampak redaman terbaik dari penerapan TLD ketika ditempatkan pada lantai teratas bangunan gedung. Jika dilihat dari besar perpindahan atau simpangan yang terjadi pada bangunan gedung, lantai teratas memiliki nilai perpindahan atau simpangan yang cukup besar dibandingkan dengan lantai di bawahnya. Maka dari itu, saat diberi massa tambahan berupa cairan dalam bentuk TLD, gaya akibat getaran yang menimbulkan simpangan akan berkurang.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa perbedaan parameter yang dikatakan efektif dalam meredam struktur melalui peredam TLD. Menurut Bikram Rana dkk., (2018) parameter yang mempengaruhi keefektifan dari peredam TLD ini yaitu sebagai berikut :

1. Rasio Kedalaman (*Depth Ratio*) merupakan rasio antara kedalaman air terhadap panjang tangki dalam arah gerakan air.
2. Rasio Massa (*Mass Ratio*) merupakan rasio antara massa cairan terhadap massa bangunan.
3. Rasio Frekuensi (*Tuning Rasio*) merupakan rasio antara frekuensi dari TLD terhadap frekuensi alami struktur bangunan.
4. Bentuk Tangki (*Shape of Tank*), bentuk tangki dapat berupa lingkaran, persegi, prisma atau bentuk geometri lain. Perbedaan bentuk tangki ini dapat mempengaruhi gerakan air.
5. Posisi Tangki (*Position of Tank*), posisi peletakan tangki berisi air sebagai peredam TLD ini dapat diletakan di lantai pertengahan atau di atas bangunan dan dapat diletakkan di tengah, tepi, atau di sudut lantai tersebut. Dan tentunya posisi dari peletakan tangki ini juga berpengaruh dalam menunjang keefektifan dari TLD.

2.2.4 Penelitian Terkait TLD sebagai Peredam Struktur

Kartha & R (2015) dalam eksperimennya yang menggunakan rangka baja dengan *shaking table* yang ditambahkan penyimpanan air berbentuk kotak sebagai

media peredam, menggunakan beberapa variasi kedalaman air ditambahkan ke dalam penyimpanan tersebut dan menyimpulkan bahwa efek redaman dapat berkurang seiring dengan meningkatnya kedalaman cairan pada TLD dikarenakan pergerakan cairan yang menciptakan gelombang hingga gelombang pecah menjadi berkurang karena seluruh massa air pada peredam tidak berkontribusi pada pergerakan air.

Chen & Huang (2015) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa tangki cair yang disetel dengan rasio d/b antara 0,3 sampai 0,35 memiliki kinerja kontrol getaran yang paling baik. Ishak dkk. (2021) mempelajari parameter rasio kedalaman dengan tingkat air bervariasi yaitu $\frac{1}{4}$ tangki, $\frac{1}{2}$ tangki, dan $\frac{3}{4}$ tangki, hasilnya menunjukkan bahwa peredaman terbaik yaitu tangki dengan kedalaman $\frac{3}{4}$ tangki yang menunjukkan perpindahan struktural sebesar 12,6 mm jika dibandingkan dengan tingkat air pada tangki lainnya.

Berdasarkan simulasi numerik dan eksperimen Ramdani dkk. (2023), amplitudo perpindahan dan rasio redaman dapat mencapai titik optimum pada rasio d/L antara 0,2 dan 0,4. Kebeli dkk. (2024) meneliti efektivitas antara TLD dan TLCD dengan penempatan keduanya di atas struktur dan tinggi cairan yang bervariasi dengan tinggi tangki 30 cm dan lebar tangki 10 cm, ditemukan bahwa model dengan TLD dengan tinggi cairan 20 cm memiliki rasio peredam mencapai 9,82% yang menunjukkan bahwa TLD lebih efektif dalam hal percepatan, perpindahan dan rasio redaman.

Al Aidi (2024) menyimpulkan berdasarkan penelitiannya bahwa dengan adanya kolam renang pada lantai teratas sebagai bak air dengan gerakan hidrodinamik air dapat mereduksi respons struktur terhadap getaran yang dibuktikan dengan hasil penelitiannya bahwa data simpangan, gaya geser dasar dan percepatan *joint* mengalami pengurangan setelah diberikan pembebanan dinamik berupa gempa dan sinusoidal.

2.3 Beban

Dalam merancang suatu struktur, perlu mengidentifikasi berbagai jenis beban yang akan bekerja pada struktur tersebut. Menurut Badan Standardisasi Nasional dalam SNI 1727:2020, beban merupakan gaya atau aksi lainnya akibat

berat seluruh bahan bangunan, penghuni dan barang-barang yang dimilikinya, efek lingkungan, perbedaan pergerakan, dan gaya kekangan akibat perubahan dimensi.

Proses pembebanan ini dilakukan guna memastikan bahwa bangunan yang direncanakan dapat memenuhi standar kelayakan dari segi keamanan dan kekuatannya. Oleh karena itu, perencanaan beban harus dilakukan dengan teliti untuk mengurangi risiko kegagalan struktur di masa mendatang. Terdapat dua kategori utama dalam beban yang terdapat pada struktur, yaitu beban statis dan beban dinamis.

2.3.1 Beban Statis

Beban ini merupakan beban yang bersifat tetap dan tidak berubah-ubah seiring berjalannya waktu selama masa pakai struktur. Beban ini biasanya disebabkan oleh berat bangunan itu sendiri, seperti beton, baja, dan elemen-elemen permanen lainnya. Di dalam perencanaan struktur, beban statis ini sangat penting, karena dapat memberikan gambaran dasar mengenai bagaimana struktur dapat menahan beban yang bersifat tetap. Beban statis juga digunakan untuk menentukan ukuran dan ketahanan elemen struktural seperti kolom, balok, dan fondasi.

2.3.1.1 Beban Mati

Salah satu contoh utama dalam beban statis yaitu beban mati (*dead load*) yang mencakup berat struktur bangunan itu sendiri dan diukur berdasarkan berat dari semua elemen bangunan yang tidak bergerak dan terpasang termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktural lain. Untuk nilai beban mati minimum bersumber dari SNI 1727:2020 dalam lampiran Tabel C3.1-1.

Selain itu, terdapat beban *lift* yang didefinisikan sebagai beban mati terpusat yang ditumpu oleh balok *lift*. Berikut merupakan pembebanan pada *lift* yaitu:

1. Beban yang bekerja pada balok penumpu yaitu beban dari mesin penggerak *lift*, berat kereta luncur, dan perlengkapan (R1) dan beban akibat bandul pemberat dan perlengkapannya (R2).
2. Koefisien kejut oleh keran sebagai beban rencana berdasarkan persamaan berikut.

$$\Psi = (1 + k_1 k_2 v) \geq 1,15 \quad (2.1)$$

Sehingga beban yang ditumpu oleh balok *lift* yaitu sebagai berikut:

$$P = \Sigma R\Psi \quad (2.2)$$

Dengan:

Ψ = Koefisien kejut dengan nilai tidak boleh kurang dari 1,15.

v = Kecepatan angkat maksimum dalam m/det pada pengangkatan muatan maksimum dalam kedudukan keran induk dan keran angkat yang paling menentukan untuk struktur yang ditinjau dengan nilai tidak boleh diambil lebih dari 1,00 m/s.

k_1 = Koefisien yang bergantung pada kekakuan struktur keran induk, untuk keran induk menggunakan struktur rangka, dengan nilai dapat diambil sebesar 0,6.

k_2 = Koefisien yang bergantung pada sifat mesin angkat dari keran angkatnya, dengan nilai diambil sebesar 1,3.

2.3.1.2 Beban Hidup

Selain beban mati, di dalam beban statis juga terdapat beban hidup (*live load*) yaitu beban yang mungkin berubah-ubah 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, ataupun beban mati (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Beban ini juga merupakan beban yang dapat ada atau dapat juga tidak ada pada suatu struktur bangunan dalam waktu yang diberikan.

Untuk menentukan beban hidup secara pasti yang bertumpu pada suatu lantai dapat dikatakan cukup sulit, karena fluktuasi dari beban hidup ini cukup bervariasi dan tergantung dari banyak faktor. Namun, meskipun beban hidup bervariasi, beban ini tetap dianggap statis dalam analisis struktur dikarenakan dihitung berdasarkan perkiraan yang cukup stabil dalam jangka panjang.

Sehingga beban hidup yang direncanakan untuk bangunan gedung harus merupakan beban maksimum yang direncanakan akan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, namun tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang terdapat dalam Tabel 2.1 sesuai dengan SNI 1727:2020 terkait pembebanan.

Tabel 2.1 Beban Hidup Minimum

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)				
Sistem lantai akses				
– Ruang kantor	50 (2,4)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2000 (8,9)
– Ruang komputer	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2000 (8,9)
Ruang Pertemuan				
– Kursi tetap	60 (2,87)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Lobi	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Kursi berpindah	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Panggung pertemuan	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Lantai podium	150 (7,18)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Tribun penonton stadion dan arena dengan kursi tetap	60 (2,87)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Ruang pertemuan lainnya	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
	yang dilayani. Tidak melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)			
Jalur untuk akses pemeliharaan	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	300 (1,33)
Koridor – Lantai pertama – Lantai lain	100 (4,79) Sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Ruang makan dan restoran	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
Hunian (lihat rumah tinggal)				
Dudukan mesin elevator (pada area 2 in. x 2 in. [50 mm x 50 mm])		-	-	300 (1,33)
Konstruksi pelat lantai finishing ringan (pada area 1 in.x1 in. [25 mm x 25 mm])		-	-	200 (0,89)

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Jalur penyelamatan saat kebakaran	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Hunian satu keluarga saja	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Tangga permanen		-	-	Lihat Pasal 4.5.4
Garasi/Parkir (Lihat Pasal 4.10)				
– Mobil penumpang saja	40 (1,92)	Tidak (4.7.4)	Ya (4.7.4)	Lihat Pasal 4.10.1
– Truk dan bus	Lihat Pasal 4.10.2	-	-	Lihat Pasal 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman	Lihat 4.5.1	-	-	Lihat 4.5.1
– Batang pegangan				Lihat 4.5.2
Helipad (Lihat Pasal 4.11)				
– Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang	40 (1,92)	Tidak (4.11.1)	-	Lihat Pasal 4.11.2
– Helikopter dengan berat lepas landas Lebih dari 3.000 lb (13,35 kN)	60 (2,87)	Tidak (4.11.1)	-	Lihat Pasal 4.11.2
Rumah sakit	60 (2,87)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
– Ruang operasi, laboratorium	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
– Ruang pasien	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
– Koridor di atas lantai pertama				
Hotel (lihat rumah tinggal)				
Perpustakaan				
– Ruang baca	60 (2,87)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
– Ruang penyimpanan	150 (7,18)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	1000 (4,45)
– Koridor di atas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
Pabrik				
– Ringan	125 (6,00)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	2000 (8,90)
– Berat	250 (11,97)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	3000(13,35)
Gedung perkantoran				
– Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				
– Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)
– Kantor	50 (2,40)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)
	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2.000 (8,90)

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
– Koridor di atas lantai pertama				
Lembaga hukum				
– Blok sel	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Koridor	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Tempat rekreasi				
– Tempat <i>bowling</i> , <i>billiard</i> , dan penggunaan sejenis	75 (3,59)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Ruang dansa dan <i>ballroom</i>	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Gimnasium	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
Rumah tinggal Hunian satu dan dua keluarga				
– Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang	10 (0,48)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang	20 (0,96)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	30 (1,44)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Semua ruang kecuali tangga	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Semua hunian rumah tinggal lainnya	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Ruang pribadi dan koridornya	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
– Ruang publik	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
– Koridor ruang publik				
Atap				
Atap datar, berbubung, dan lengkung	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-	
Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)	-	
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,70)	Ya (4.8.3)	-	
Atap vegetatif dan atap lanskap				
– Atap bukan untuk hunian	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-	
– Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,79)	Ya (4.8.3)	-	
– Atap untuk penggunaan lainnya	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)	-	
<i>Awning</i> dan kanopi				
– Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh	5 (0,24)	Tidak (4.8.2)	-	

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
struktur rangka kaku ringan				
Rangka penumpu layar penutup	5 (0,24) Berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka	Tidak (4.8.2)	-	200 (0,89)
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-	
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja				
– Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap di atas pabrik, gudang				2000 (8,90)

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
penyimpanan dan pekerjanya, dan garasi bengkel – Semua komponen struktur atap utama lainnya Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		- -	- -	300 (1,33) 300 (1,33)
Sekolah Ruang kelas Koridor di atas lantai pertama Koridor lantai pertama	40 (1,92) 80 (3,83) 100 (4,79)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	1000 (4,45) 1000 (4,45) 1000 (4,45)
Scuttles, rusuk untuk atap kaca dan langit- langit yang dapat diakses				200 (0,89)
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	250 (11,97)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	8000 (35,60)
Tangga dan jalan keluar Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	300 (1,33) 300 (1,33)

Hunian atau Penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi Beban Hidup Diizinkan? (No. Pasal)	Reduksi Beban Hidup Berlantai Banyak Diizinkan? (No. Pasal)	Terpusat lb (kN)
Gudang di atas langit-langit	20 (0,96)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan)				
– Ringan	125 (6,00)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	
– Berat	250 (11,97)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	
Toko				
Eceran				
– Lantai pertama	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
– Lantai di atasnya	75 (3,59)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
Grosir, di semua lantai	125 (6,00)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	1000 (4,45)
Penghalang kendaraan				Lihat Pasal 4.5.3
Susuran jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	60 (2,87)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

2.3.1.3 Beban Air Hujan

Beban air hujan disimbolkan dengan R yang diperhitungkan pada atap agar mampu menahan beban dari air hujan yang terakumulasi apabila sistem drainase

primer terhambat, ditambah dengan beban merata akibat kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran desainnya.

$$R = 0,0098(d_s + d_h) \quad (2.3)$$

Dimana:

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

d_s = tinggi statis (mm)

d_h = tinggi kepala hidraulik (mm)

2.3.1.4 Beban Angin

Untuk beban angin ini, sebenarnya mempunyai efek statis dan dinamis. Menurut (Siapundan, 2023) efek statis yang ditimbulkan berasal dari struktur yang berada pada lintasan angin, sehingga akan menyebabkan angin menjadi berbelok atau berhenti. Maka akibatnya, energi kinetik angin berubah bentuk menjadi energi potensial yang berupa tekanan atau isapan pada struktur.

Sedangkan untuk efek dinamis dapat muncul dengan berbagai cara, salah satunya bahwa angin sangat jarang mempunyai fenomena *steady-state* (keadaan tetap). Akibatnya, bangunan dapat mendapat beban yang berbalik arah secara terus menerus. Jika itu terjadi pada gedung yang berdekatan, maka pola gerakan angin akan menjadi lebih rumit karena dapat menimbulkan aliran turbulen di antara bangunan-bangunan tersebut. Akibat dari aksi angin tersebut mengakibatkan gedung bergoyang ke berbagai arah.

Dalam melakukan perhitungan beban angin, terdapat beberapa parameter dasar menurut SNI 1727:2020 di antaranya:

1. Kecepatan angin dasar, V

Menurut Pasal 26.5, disebutkan bahwa untuk menentukan nilai V untuk beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain ditentukan dari Buku Peta Angin Indonesia yang sesuai dengan kategori risiko yang tercantum pada Tabel 2.7. Beban angin ini diasumsikan datang dari segala arah dari arah horizontal.

2. Faktor arah angin, K_d

Untuk menentukan nilai K_d diperoleh dari Tabel 2.2 yang bersumber dari SNI 1727:2020 Pasal 26.6.

Tabel 2.2 Faktor Arah Angin, K_d

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

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

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

3. Eksposur

Untuk menentukan eksposur, ditentukan dari kekasaran permukaan tanah yang berasal dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun.

Tabel 2.3 Kategori Eksposur

Kategori	Kriteria
B	Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m), dengan kekasaran permukaan tanah tipe B yaitu daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar dengan jumlah banyak, serta

Kategori	Kriteria
	berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1500 ft (457 m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1 m) dan berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan struktur.
C	Eksposur C berlaku untuk semua kasus dimana eksposur B atau D tidak berlaku, dengan kekasaran permukaan tipe C yang mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
D	Eksposur D berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah sesuai dengan tipe D yaitu permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air, termasuk hamparan lumpur halus. Selain itu, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5000 ft (1524 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur. Eksposur D juga berlaku apabila kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin tipe B atau C, dan situs berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur.

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

4. Faktor topografi, K_{zt}

Faktor topografi tentunya menjadi penentu juga seberapa besar efek peningkatan kecepatan angin yang akan terjadi pada daerah tersebut. Maka dari itu, faktor topografi, K_{zt} , dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (2.4)$$

Dengan K_1 , K_2 , dan K_3 sesuai dengan gambar 26.8.1 dalam SNI 1727:2020. Jika kondisi situs dan lokasi bangunan gedung dan struktur lain tidak memenuhi semua kondisi yang disyaratkan, maka $K_{zt} = 1,0$.

5. Faktor elevasi permukaan tanah, K_e

Berdasarkan Pasal 26.9 SNI 1727:2020 bahwa faktor elevasi permukaan tanah untuk menyesuaikan densitas udara, K_e dapat diambil nilai 1,0 untuk semua elevasi.

6. Faktor pengaruh hambatan angin, G

Untuk faktor pengaruh hambatan angin untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil nilai sebesar 0,85.

7. Klasifikasi ketertutupan

Untuk menentukan koefisien tekanan internal, semua bangunan harus diklasifikasikan sebagai bangunan tertutup, tertutup sebagian, terbuka sebagian, atau terbuka.

8. Koefisien tekanan internal, GC_{pi}

Koefisien tekanan internal, GC_{pi} ditentukan berdasarkan Tabel 2.4 di bawah.

Tabel 2.4 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 $4 \text{ ft}^2 (0,37 \text{ m}^2)$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01 A_g$ Atau $4 \text{ ft}^2 (0,37 \text{ m}^2)$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55 -0,55
Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, terbuka sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

9. Koefisien eksposur tekanan velositas, K_z atau K_h

Berdasarkan Pasal 26.10.1, untuk menentukan nilai K_z dengan ketinggian $15 \text{ ft} (4,6 \text{ m}) \leq z \leq z_g$ ditentukan melalui persamaan berikut:

$$K_z = 2,01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\frac{2}{a}} \quad (2.5)$$

Sedangkan untuk menentukan nilai K_z dengan $z < 15$ ft (4,6 m) ditentukan melalui persamaan berikut:

$$K_z = 2,01 \left(\frac{15}{z_g} \right)^{\frac{2}{a}} \quad (2.6)$$

Dengan nilai a dan Z_g dapat dilihat pada Tabel 2.5 di bawah.

Tabel 2.5 Nilai a dan Z_g

Eksposur	a	Z_g (ft)
B	7,0	1200
C	9,5	900
D	11,5	700

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

10. Tekanan velositas, q_z atau q_h

Menurut Pasal 26.10.2, untuk menentukan nilai q_z (N/m²) dapat menggunakan persamaan berikut dengan v dalam satuan m/s:

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (2.7)$$

11. Koefisien tekanan eksternal, C_p

Berdasarkan Pasal 27.3, nilai koefisien tekanan eksternal atau C_p dapat diperoleh melalui tabel berikut.

Tabel 2.6 Koefisien Tekanan Dinding, C_p

Permukaan	L/B	C_p
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0,8
	0 - 1	-0,5
Dinding di sisi angin pergi	2	-0,3
	≥ 4	-0,2
Dinding tepi	Seluruh nilai	-0,7

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2020)

12. Tekanan angin desain, p

Untuk menentukan tekanan angin desain untuk sistem penahan gaya angin utama pada gedung bertingkat rendah ditentukan melalui persamaan berikut:

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.8)$$

13. Syarat beban angin desain minimum

Beban angin yang digunakan dalam desain SPGAU untuk bangunan tertutup atau tertutup sebagian tidak boleh kurang dari 16 lb/ft² atau 0,77 kN/m² dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung.

2.3.1.5 Beban Hidrostatik

Menurut SNI 1727:2020, beban hidrostatik merupakan beban-beban yang bekerja pada suatu obyek oleh massa air yang diam. Beban ini sangat dipengaruhi oleh kedalaman zat cair tersebut.

Gaya hidrostatik yang bekerja pada permukaan dinding kolam atau permukaan lain dalam fluida statis diperoleh melalui persamaan:

$$P = \rho gh \quad (2.9)$$

Keterangan:

P = Tekanan pada permukaan

ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)

h = Kedalaman dari permukaan ke titik pusat gravitasi (m)

2.3.2 Beban Dinamis

Beban dinamis merupakan beban yang bersifat berubah-ubah seiring dengan berjalannya waktu baik itu dari segi besar, arahnya, atau posisinya (Yunus dkk., 2023). Beban ini biasanya terjadi akibat faktor-faktor eksternal seperti angin, gempa bumi, atau pergerakan objek yang menabrak suatu struktur. Beban dinamis ini memberikan pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan beban statis karena sifatnya berubah-ubah. Selain itu, beban dinamik ini sering kali sulit untuk diprediksi dan perlu untuk dihitung secara teliti untuk menghindari kerusakan struktural akibat variasi besar yang dapat terjadi.

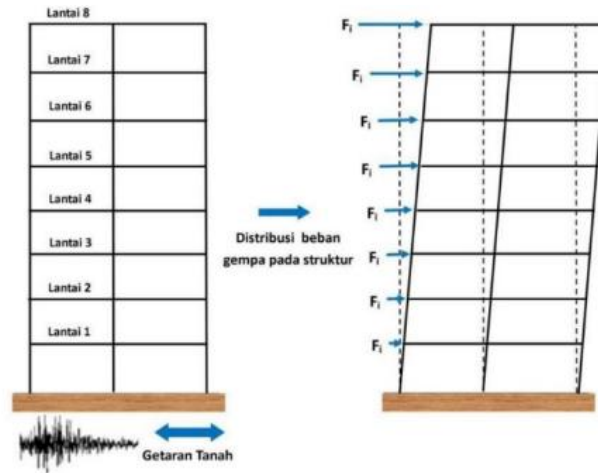
Salah satu beban dinamis yaitu beban angin (*wind load*), dimana kecepatan angin ini berubah-ubah sehingga memberikan tekanan berbeda pada struktur khususnya gedung tinggi. Selain beban angin, beban gempa (*seismic load*) dengan getaran atau pergerakan tanah dapat memberikan gaya yang sangat besar dan menyebabkan kerusakan pada struktur jika tidak dirancang dengan baik.

2.3.2.1 Beban Gempa

Gempa bumi merupakan bencana yang tidak dapat dihindari, maka dari itu, dalam perhitungan beban direncanakan beban gempa agar struktur bangunan yang direncanakan dan dibangun nantinya dapat mengurangi dampak kerusakan akibat gempa bumi. Beban gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun yaitu sebesar 2% (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Menurut Siapundan (2023), beban gempa merupakan beban yang diakibatkan oleh percepatan getaran tanah ketika terjadi gempa. Dimana faktor yang mempengaruhi besarnya beban gempa ini yaitu massa dan kekakuan struktur, waktu getar alami dan pengaruh redaman pada struktur, kondisi tanah, serta wilayah kegempaan.

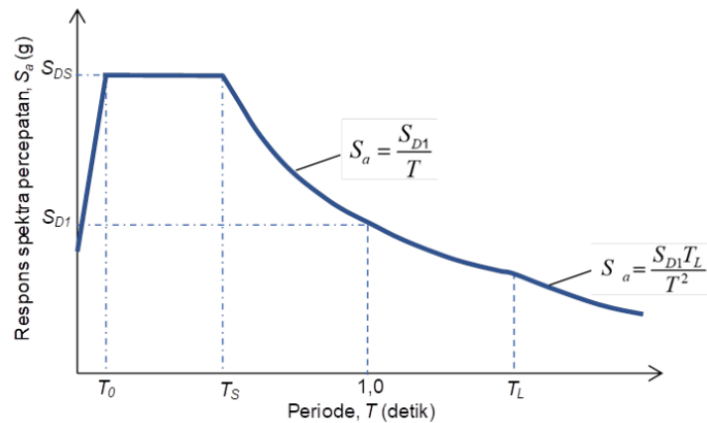
Untuk mendefinisikan beban gempa digunakan standar pada SNI 1726:2019. Dalam menganalisis beban gempa dilakukan dengan 2 cara yaitu analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik. Menurut Batara (2019), beban gempa statik ekuivalen merupakan penyederhanaan dari perhitungan beban gempa yang sebenarnya dimana tanah dasar diasumsikan tetap (tidak bergetar) sehingga beban gempa diekuivalenkan menjadi beban lateral statik yang bekerja pada pusat massa struktur tiap lantai bangunan.



Gambar 2.6 Ilustrasi Beban Gempa Statik Ekuivalen

(Sumber: Batara, 2019)

Analisis dinamik merupakan analisis struktur dengan gaya geser gempa di seluruh tingkat yang memperhitungkan pengaruh dinamis gerakan tanah terhadap struktur. Dalam analisis dinamik terdapat dua jenis, yaitu analisis respons spektrum dan analisis linear riwayat waktu. Berikut merupakan grafik dari spektrum respons desain.



Gambar 2.7 Spektrum Respons Desain

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Analisis respons spektrum merupakan metode analisis dinamik yang menggunakan metode gempa yang diperoleh dari rekaman riwayat percepatan dari model *Single Degree of Freedom* (SDOF) yang dibebani beban gempa yang berupa *ground motion*. Metode analisis respons spektrum ini diatur dalam Pasal 7.9 SNI 1726:2019. Respons spektrum adalah grafik atau plot yang menggambarkan

hubungan antara periode getar struktur T dan respons maksimum yang dialami struktur, yang dipengaruhi oleh rasio redaman tertentu serta jenis gempa yang digunakan sebagai acuan. Respons maksimum yang dimaksud dapat berupa simpangan maksimum (SD), kecepatan maksimum (SV), atau percepatan maksimum (SA) dari massa struktur SDOF.

1. Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan dan kategori risiko merupakan elemen yang cukup penting dalam merancang struktur tahan gempa yaitu untuk memastikan bahwa bangunan yang dirancang sesuai fungsinya dan dampak potensialnya terhadap keselamatan publik. Kategori risiko bangunan merupakan klasifikasi berdasarkan fungsi bangunan dan dampaknya terhadap keselamatan manusia, lingkungan, dan ekonomi apabila terjadi gempa. Kategori ini digunakan untuk menentukan tingkat desain gempa dan faktor keutamaan. Sedangkan faktor keutamaan gempa adalah parameter yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan struktur terhadap beban gempa berdasarkan tingkat kepentingan dan fungsi bangunan. Untuk memperoleh nilai faktor keutamaan gempa dan kategori risiko dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan – Fasilitas sementara – Gudang penyimpanan – Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I	1,0

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
<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/<i>mall</i> – Bangunan industri – Fasilitas manufaktur – Pabrik 	II	1,0
<p>Gedung dan non gedung 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 pertemuan – Stadion – Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat – Fasilitas penitipan anak – Penjara – Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk ke dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan</p>	III	1,25

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
<p>masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Pusat pembangkit listrik biasa – Fasilitas penanganan air – Fasilitas penanganan limbah – Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>		
<p>Gedung dan non gedung 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 	IV	1,50

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
<ul style="list-style-type: none"> – 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 <p>Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>		

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

2. Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs merupakan proses penentuan kategori suatu lokasi atau kondisi berdasarkan klasifikasi tertentu. Klasifikasi situs untuk beban gempa ditentukan pada Tabel 2.8. Menurut SNI 1726:2019 penetapan kelas situs dilakukan berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas.

Tabel 2.8 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 (tidak dapat dipakai)	N/A (tidak dapat dipakai)
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A (tidak dapat dipakai)	N/A (tidak dapat dipakai)
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	<p>Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	<p>Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuefaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) <p>Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa</p>		

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

3. Parameter Percepatan Gempa Batuan Dasar

Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik (S_s) dan periode 1 detik (S_l). Data tersebut dapat diperoleh melalui Desain Spektra Indonesia dengan memasukkan jenis tanah dan lokasi yang akan ditinjau melalui *website* <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>.

4. Koefisien Situs

Menurut Pasal 6.2 SNI 1726:2019, faktor amplifikasi terdiri dari faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek atau 0,2 detik yang disebut F_a dan faktor amplifikasi terkait percepatan pada getaran periode 1 detik atau F_v . Untuk menentukan nilai F_a dan F_v dapat dilihat pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10.

Tabel 2.9 Koefisien Situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) 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 = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik					

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Tabel 2.10 Koefisien Situs, F_v

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

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode 1 detik, S_I					
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik					

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

5. Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa

Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.10)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.11)$$

6. Parameter Percepatan Spektral Desain

Untuk menentukan nilai parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek atau 0,2 detik (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}), Pasal 6.3 SNI 1726:2019 merumuskan:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.12)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.13)$$

7. Sistem Struktur

Sistem struktur merupakan gabungan atau susunan dari beberapa elemen struktur untuk membentuk satu kesatuan sehingga dapat memikul beban yang direncanakan.

Berdasarkan SNI beton, sistem struktur dasar penahan beban lateral secara umum dapat dibedakan menjadi sistem rangka pemikul momen dan sistem dinding

struktural. Sistem struktur yang digunakan harus sesuai dengan batasan sistem struktur dan batasan ketinggian struktur serta kategori desain seismik (KDS). Sehingga dalam penentuan gaya geser, gaya desain elemen, dan simpangan antar tingkat desain dapat digunakan nilai koefisien modifikasi respons, R , faktor kuat lebih sistem, Ω_0 , dan faktor pembesaran simpangan lateral, C_d sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2.15.

Menurut SNI 1726:2019, Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM) adalah sistem struktur rangka yang elemen-elemen struktur dan sambungannya menahan beban-beban lateral melalui mekanisme lentur. Sistem rangka pemikul momen biasanya berbentuk segi empat yang teratur dan terdiri dari balok yang membentang horizontal di antara kolom yang berdiri vertikal dimana keduanya saling terhubung satu sama lain secara kaku (*rigid*), sehingga dari gabungan keduanya dapat menahan momen. Dari hubungan kolom dan balok yang kontinuitas ini menyebabkan mekanisme rangka dalam menahan beban lateral. Sistem rangka pemikul momen ini terbagi menjadi tiga jenis, di antaranya:

a. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Menurut SNI 2847:2019 Pasal 18.3 disebutkan bahwa sistem rangka ini hanya berlaku untuk bangunan rangka momen biasa yang dikenakan kategori KDS B dengan tingkat daktilitas yang terbatas.

b. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Untuk sistem rangka pemikul momen menengah, berdasarkan SNI 2847:2019 dalam Pasal 18.4 disebutkan bahwa struktur yang termasuk ke dalam kategori KDS C dapat menggunakan sistem rangka ini. Dimana sistem ini memiliki tingkat daktilitas menengah.

c. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Disebutkan dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.2.3 sampai 18.2.8 dan 18.6 sampai 18.8 bahwa struktur dengan KDS D, E, atau F dapat menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan tingkat daktilitas penuh.

8. Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur merupakan waktu yang diperlukan oleh suatu struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran penuh saat terkena beban

dinamis seperti gempa. Parameter ini dapat memengaruhi respons struktur terhadap gempa dan gaya geser yang bekerja. Namun jika periode ini lebih besar maka dapat mengurangi percepatan yang diterima, dapat meningkatkan nilai perpindahan sehingga nilai periode yang salah estimasi akan mengakibatkan desain yang tidak ekonomis dan tidak aman. Maka dari itu, diperlukannya perhitungan pendekatan periode fundamental sebagai batas dari periode yang akan dimasukkan ke dalam aplikasi. Berikut merupakan persamaan periode fundamental pendekatan (T_a) berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.2.1 untuk menentukan batas bawah dari nilai periode:

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.14)$$

Dengan:

h_n = ketinggian struktur, di atas dasar sampai tingkat tertinggi struktur (m)

C_t = koefisien pada Tabel 2.11

x = nilai yang didapat pada Tabel 2.11

Tabel 2.11 Nilai Parameter C_t dan x

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

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Menurut SNI 1726:2019 dalam Pasal 7.8.2 disebutkan bahwa periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi batas atas yang ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$T = C_u T_a \quad (2.15)$$

Dengan:

T = periode fundamental (detik)

C_u = koefisien periode batas atas, diperoleh pada Tabel 2.12.

T_a = periode pendekatan fundamental (detik)

Tabel 2.12 Koefisien C_u

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 Detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

9. Desain Respons Spektrum

Menurut SNI 1726:2019 Pasal 6.4 untuk menentukan desain respons spektrum dapat diperoleh dari kurva pada Gambar 2.7 dengan ketentuan sebagai berikut:

- Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.16)$$

$$T_0 = 0,2 \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \right) \quad (2.17)$$

- 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} ;

- c. Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L yang diperoleh dari Gambar 2.8, respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

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

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.19)$$

- d. Untuk periode lebih besar dari T_L (Gambar 2.8), respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

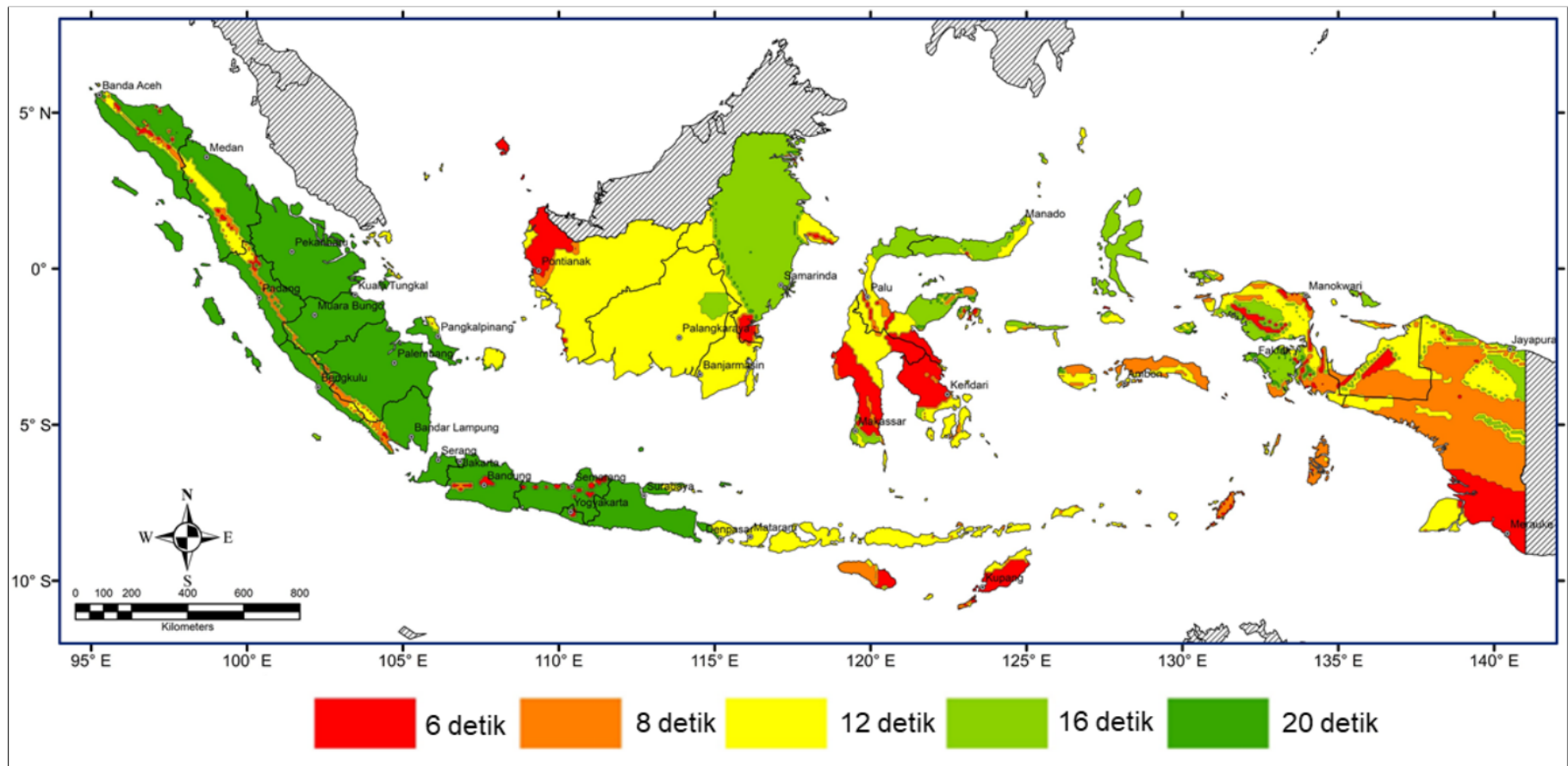
$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.20)$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek atau 0,2 detik.

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

T = Periode getar fundamental struktur



Gambar 2.8 Peta Transisi Periode Panjang, T_L , Wilayah Indonesia
(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

10. Kategori Desain Seismik

Kategori ini didasarkan pada kategori risikonya dan parameter respons percepatan desainnya baik itu pada periode pendek atau 0,2 detik maupun 1 detik. Diatur dalam Pasal 6.5 SNI 1726:2019, untuk menentukan kategori desain seismik ditunjukkan pada Tabel 2.13 dan Tabel 2.14.

Tabel 2.13 Kategori Desain Seismik untuk Periode Pendek

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

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Tabel 2.14 Kategori Desain Seismik untuk Periode 1 Detik

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

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

11. Koefisien Rancangan

Nilai-nilai pada koefisien rancangan yaitu koefisien modifikasi respon, R , faktor kuat lebih sistem, Ω_0 , dan faktor pembesaran simpangan lateral, C_d digunakan dalam menentukan geser dasar, gaya desain elemen, dan simpangan antar tingkat desain. Untuk menentukan koefisien tersebut, tercantum dalam SNI 1726:2019 pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Koefisien Rancangan

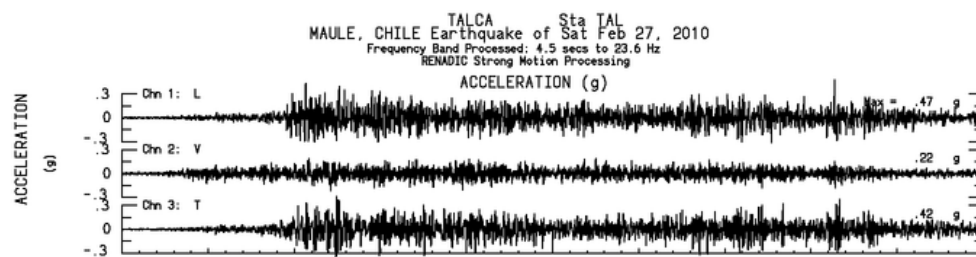
Sistem Pemikul Gaya Seismik	R ^a	Ω ₀	C _d ^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h _n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen 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°	3 ½	10	10	10	10	10

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Selain analisis respons spektrum, jenis dari analisis dinamik yang lainnya yaitu metode analisis riwayat waktu merupakan metode analisis dinamis untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban gempa berdasarkan riwayat percepatan gempa tertentu. Metode ini dilakukan dengan cara menggunakan data percepatan gempa waktu nyata (*actual earthquake ground motion*) untuk menghitung respons struktur secara detail pada setiap interval waktu. Data riwayat percepatan dicocokkan secara spektral yang kompatibel dengan respons spektra desain di tempat itu. Data tersebut dapat diperoleh melalui *website* Peer Berkeley.

1. *Ground Motion* (GM)

Berdasarkan SNI 1726:2019 dalam Pasal 7.9.2.3 disebutkan bahwa untuk menganalisis riwayat percepatan tanah diperlukan minimal tiga data *Ground Motion* (GM) dengan kemiripan magnitudo dan jarak sumber gempa yang ditinjau.



Gambar 2.9 Ilustrasi Data *Ground Motion*

(Sumber: Strong Motion Center, 2024)

2. *Spectra Matching*

Dalam menentukan *spectra matching* digunakan aplikasi SeismoMatch. Namun sebelum itu, dilakukan penentuan rentang periode. Untuk menentukan rentang tersebut, telah diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.3.1 yang menyebutkan bahwa setiap komponen dari gerak tanah harus mencocokkan spektral dalam rentang $0,8 T_{\text{lower}}$ sampai dengan $1,2 T_{\text{upper}}$ dengan catatan rekaman gempa yang telah dicocokkan tidak boleh kurang atau lebih dari 10% spektrum target. Dengan T_{lower} merupakan periode getar pada saat 90% partisipasi massa aktual yang telah terpenuhi pada masing-masing respons dua arah ortogonal sedangkan T_{upper} merupakan nilai yang lebih besar di antara dua nilai periode getar fundamental ortogonal.

3. Gaya Geser Dasar Elastik dan Inelastik

Gaya geser dasar elastik untuk setiap gerak tanah yang dianalisis harus ditentukan, baik itu untuk arah x, V_{EX} maupun arah y, V_{EY} . Sedangkan untuk gaya geser dasar inelastik maksimum untuk arah x, V_{IX} dan arah y, V_{IY} ditentukan berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.2.5.1 sebagai berikut:

$$V_{IX} = \frac{V_{EX} I_e}{R_x} \quad (2.21)$$

$$V_{IY} = \frac{V_{EY} I_e}{R_y} \quad (2.22)$$

Dengan R_x dan R_y merupakan koefisien modifikasi respons untuk arah x dan arah y.

2.3.2.2 Beban Hidrodinamik

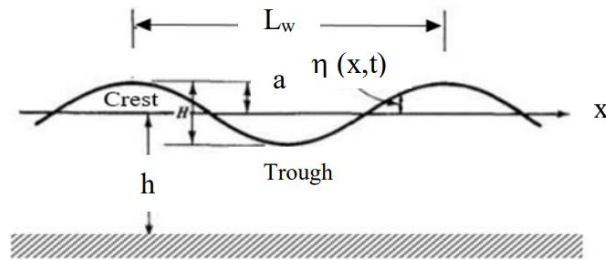
1. Fenomena Gelombang (*Sloshing*)

Gelombang merupakan fenomena dinamika fluida yang terjadi ketika cairan di dalam sebuah wadah mengalami osilasi akibat gaya eksternal seperti getaran. Ketika frekuensi dari gelombang air disesuaikan dengan frekuensi alami dari suatu struktur, maka hal tersebut dapat menjadi sumber terjadinya disipasi energi yang bersifat meredam suatu getaran struktur (Bozer, 2021).

Fenomena gelombang yang terjadi pada kolam di lantai atas gedung dapat terjadi ketika air di dalam kolam bergoyang akibat adanya gaya eksternal seperti gempa bumi, angin kencang atau getaran struktural. Ketika suatu wadah yang berisi cairan dikenakan percepatan horizontal, permukaan cairan akan bebas bergerak naik di satu sisi wadah dan bergerak turun di sisi lainnya sehingga terbentuk suatu gelombang. Frekuensi yang membentuk gelombang cairan dipengaruhi oleh dimensi wadah dan kedalaman cairan (Bozer, 2021).

Bentuk dan periode yang dihasilkan oleh gelombang tidak selalu sama, sehingga beberapa teori hanya menggambarkan bentuk gelombang dengan sederhana dengan pendekatan dari gelombang yang terjadi. Berikut merupakan

teori gelombang Airy yang biasanya digunakan dalam mengestimasi karakteristik gelombang air dan efeknya.



Gambar 2.10 Skema Gelombang

(Sumber: Dean & Dalrymple, 1991 dalam Ramdani dkk., 2023)

Berdasarkan persamaan diferensial yang menghasilkan gerakan periodik dan harmonik kemudian menghasilkan persamaan frekuensi sudut sebagai berikut:

$$\omega^2 = g k \tanh kh \quad (2.23)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.24)$$

Keterangan:

k = Bilangan gelombang (rad/m)

h = Kedalaman air (m)

λ = Panjang satu gelombang (m)

ω = Frekuensi sudut

Selain teori airy, Housner (1963) juga pernah mengembangkan model untuk memahami perilaku osilasi cairan (gelombang) di dalam tangki atau wadah yang disebabkan oleh eksitasi dinamis. Teori yang dikembangkan oleh Housner memiliki konsep bahwa cairan memiliki dua komponen gerakan, yaitu gerakan *impulsive* dimana cairan di dekat dinding tangki bergerak bersama tangki dan menciptakan tekanan yang hampir statis, serta gerakan gelombang dimana cairan beban di atas permukaan bergerak dengan pola osilasi yang menghasilkan frekuensi alami yang bergantung pada geometri tangki. Bagian air yang mengalami gerakan gelombang ini dinamakan *convective*.

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = 2\pi \frac{\sqrt{L}}{\lambda} \quad (2.25)$$

$$\lambda = \sqrt{3,16 \text{ g} \tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right]} \quad (2.26)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3,16 \text{ g} \frac{\tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right]}{L}} \quad (2.27)$$

Keterangan:

T_c = Periode *convective*

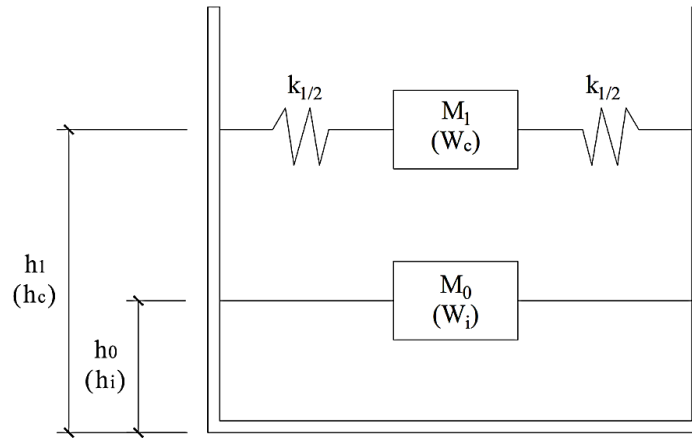
L = Panjang atau lebar tangki

H = Kedalaman air tangki

Dari beberapa penelitian mengenai konsep TLD dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan penggunaan bak air pada bangunan dapat mengurangi perpindahan yang terjadi akibat beban gempa. Hal ini dikarenakan air dapat menyerap energi getaran yang dialami oleh gedung melalui gerakan gelombang. Fenomena ini menyebabkan air memberikan gaya berupa tekanan dan tarikan pada dinding tangki.

2. *Spring Mass System*

Dalam penelitian Bozer (2021) yang mengadopsi teori Housner mengemukakan terkait pergerakan air di dalam tangki saat diberi percepatan tanah horizontal atau getaran dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian dengan gaya yang berasal dari massa *impulsive* (M_0), dimana ketika dinding tangki bergerak bolak-balik, sebagian air dipaksa untuk bergerak bersama tangki sehingga massa ini terhubung kaku pada tangki pada ketinggian tertentu (h_0). Bagian lainnya bertindak sebagai massa *convective* (M_1), dimana gerakan ini memicu osilasi pada bagian permukaan air yang dapat bergerak secara horizontal terhadap pegas penahan (k_1) dengan ketinggian dari dasar setinggi h_1 . Ilustrasi dari teori Housner dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Sistem Dinamik Ekuivalen

Nilai dari parameter-parameter yang terdapat pada Gambar 2.11 dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$M_0 = M \cdot \frac{\tanh(1,7L/2h)}{1,7L/2h} \quad (2.28)$$

$$M_1 = M \cdot 0,83 \cdot \frac{\tanh(1,6 \cdot 2h/L)}{1,6 \cdot 2h/L} \quad (2.29)$$

$$k_1 = 3 \cdot \frac{M_1^2 \cdot gh}{M \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (2.30)$$

$$h_0 = \frac{3}{8} \cdot h \cdot \left[1 + \alpha \left(\frac{M}{M_1} \left(\frac{L}{4h} \right)^2 - 1 \right) \right] \quad (2.31)$$

$$h_1 = h \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{M}{M_1} \cdot \left(\frac{L}{4h} \right)^2 - 0,63 \cdot \beta \cdot \frac{L}{4h} \sqrt{0,28 \left(\frac{M}{M_1} \cdot \frac{L}{4h} \right)^2 - 1} \right) \quad (2.32)$$

Keterangan:

M = Massa total air dalam tangki

L = Panjang tangki

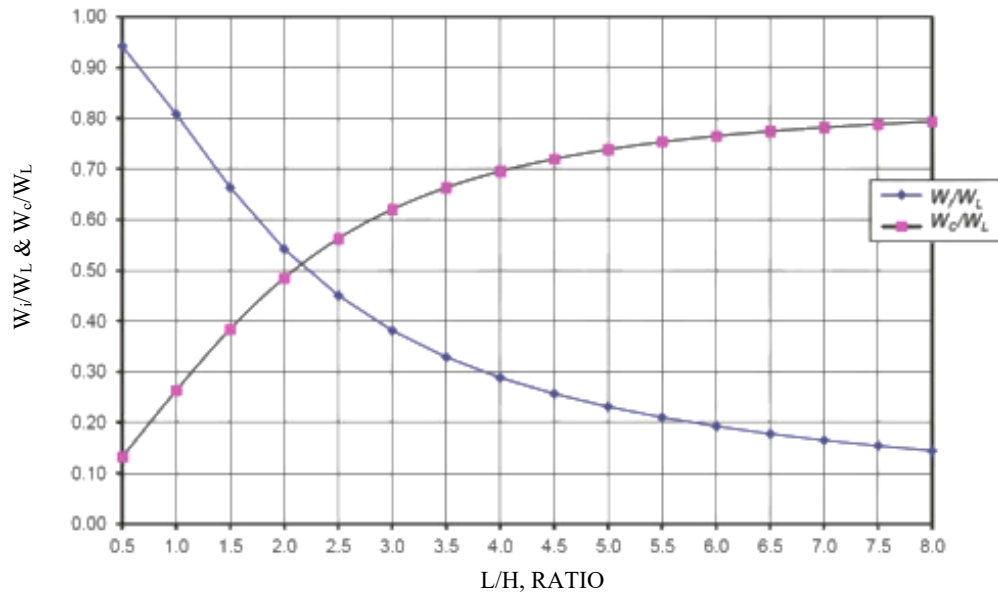
H = Tinggi air dalam tangki

α = 1,33

β = 2,0

3. *Spring Mass System* berdasarkan ACI 350.3-20

Teori dari Housner ini dimuat ke dalam peraturan yang telah disesuaikan misalnya pada ACI 350.3-20 yang memuat beberapa penyesuaian yaitu pendekatan persamaan ketinggian massa *impulsive* dan *convective*.



Gambar 2.12 Grafik Massa *Impulsive* dan *Convective* terhadap Rasio L/H

(Sumber: American Concrete Institute, 2021)

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh(0,866 \cdot L/H)}{0,866 \cdot L/H} \quad (2.33)$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0,264 \left(\frac{L}{H} \right) \tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right] \quad (2.34)$$

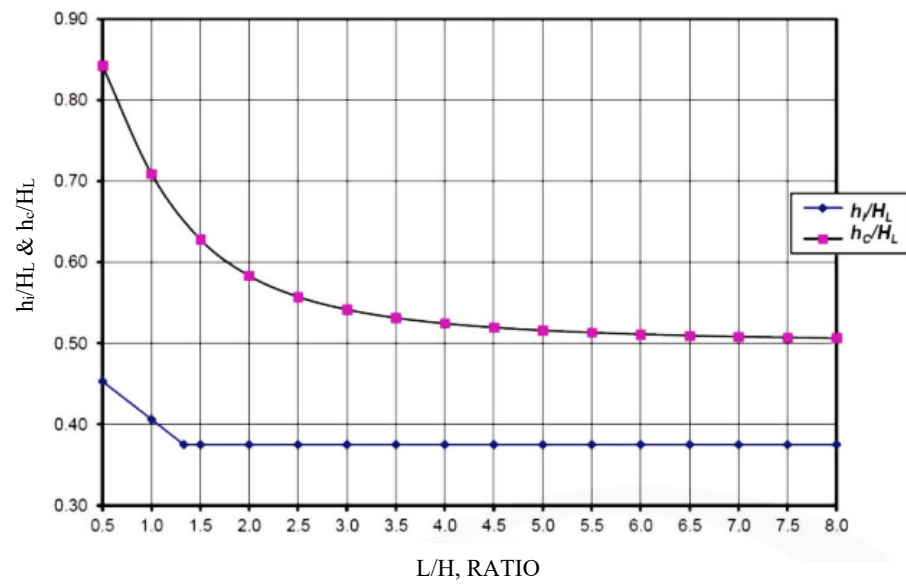
Keterangan:

W_i = Massa air *impulsive* atau M_0

W_c = Massa air *convective* atau M_1

W_L = Massa air keseluruhan atau M

Selain itu, ACI 350.3-20 juga mengemukakan terkait faktor ketinggian *impulsive* dan *convective* terhadap rasio L/H yang dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Grafik Ketinggian *Impulsive* dan *Convective* terhadap Rasio L/H
(Sumber: American Concrete Institute, 2021)

Berikut persamaan untuk tangki dengan perbandingan $L/H_L < 1,333$:

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,5 - 0,09375 \cdot \left(\frac{L}{H} \right) \quad (2.35)$$

Persamaan untuk tangki dengan rasio $L/H_L > 1,333$:

$$\frac{h_i}{H_L} = 0,375 \quad (2.36)$$

Persamaan h_c untuk semua jenis tangki:

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right] - 1}{3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \sinh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right]} \quad (2.37)$$

Keterangan:

- h_i = Ketinggian air *impulsive*
- h_c = Ketinggian air *convective*
- H_L = Ketinggian air keseluruhan

4. Pemodelan pada SAP2000

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Al Aidi (2024) dengan sumber (Bikram Rana dkk., 2008), pemodelan TLD pada SAP2000 ini berlaku sebagai *spring mass system* pada bagian kolam renang. Untuk memodelkan air sebagai *convective* maupun *impulsive* dibuat dalam bentuk *nodes* dengan ketinggian masing-masing yang telah ditentukan berdasarkan persamaan sebelumnya kemudian dibebani massa masing-masing. Selain itu, nilai k dimasukkan sebagai kekakuan pegas baik itu dalam massa *convective* dengan nilai kekakuan yang telah ditentukan berdasarkan persamaan sebelumnya maupun massa *impulsive* yang bergerak secara *rigid* bersama dinding kolam. Nilai kekakuan ini menghubungkan antara *nodes* dengan massa *convective* dan *impulsive* dengan dinding kolam.

2.3.3 Kombinasi Pembebanan

Berdasarkan SNI 1727:2020 dalam Pasal 2.3.1 dan SNI 1726:2019 dalam Pasal 4.2.2.1 untuk struktur, komponen, dan fondasi harus didesain sedemikian rupa agar kekuatan desainnya sama atau bahkan melebihi efek beban-beban terfaktor sebagaimana dalam kombinasi berikut:

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

Sedangkan untuk efek beban seismik digunakan kombinasi berikut sebagaimana tercantum dalam Pasal 4.2.2.3 dalam SNI 1726:2019:

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

Dengan nilai E_v yang dapat diperoleh dari Pasal 7.4.2.2 SNI 1726:2019 dan E_h dalam Pasal 7.4.2.1 yaitu sebagai berikut:

$$E_x = 0,2 S_{DS} D \quad (2.38)$$

$$E_h = \rho Q_E \quad (2.39)$$

Keterangan:

- E_v = Pengaruh beban seismik vertikal
 S_{DS} = Percepatan respons spektral desain pada periode pendek
 D = Pengaruh beban mati
 E_h = Pengaruh beban seismik horizontal
 ρ = Faktor redundansi (dalam Pasal 7.3.4.2 SNI 1726:2019)
 Q_E = Pengaruh gaya seismik horizontal (dalam Pasal 7.5.4)

2.4 Struktur Beton Bertulang

Struktur bangunan merupakan sistem yang dirancang untuk mendukung dan menyalurkan beban dari berbagai elemen struktur ke tanah secara aman dan efisien. Secara umum, struktur bangunan gedung terdiri dari struktur atas (*upper structure*) yaitu bagian dari struktur bangunan gedung yang berada di atas muka tanah seperti kolom, balok dan pelat. Selain struktur atas, ada juga struktur bawah (*sub structure*) yaitu bagian dari struktur bangunan yang berada di bawah muka tanah contohnya fondasi.

Struktur bangunan ini harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang lengkap, dimana harus mampu memberikan kekuatan, kekakuan dan kapasitas disipasi energi yang cukup untuk menahan gerak tanah desain dalam batasan-batasan kebutuhan deformasi (Siapundan, 2023).

Selanjutnya menurut SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan, dimana dijelaskan mengenai pengertian dari struktur beton bertulang (*reinforced concrete*) adalah beton struktural yang diberi tulangan tidak kurang dari jumlah baja prategang atau tulangan nonprategang minimum yang ditetapkan dalam standar termasuk elemen-elemen yang memenuhi persyaratan beton prategang dan nonprategang.

Meskipun memiliki kuat tekan yang tinggi, namun beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami keretakan. Oleh karena itu, agar beton dapat bekerja dengan baik dalam sistem struktur, maka beton perlu dibantu dengan diberi perkuatan penulangan yang berfungsi menahan gaya tarik (Asroni, 2017). Maka beton bertulang memiliki kekuatan tarik yang berasal dari tulangan baja sekaligus kekuatan tekan dari campuran beton. Sehingga beton bertulang ini cocok untuk semua jenis elemen struktur.

2.4.1 Material Beton

Berdasarkan SNI 2847:2019, beton merupakan campuran antara semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Beton ini dibentuk dari agregat campuran (halus dan kasar) dan ditambah dengan pasta semen. Pasta semen inilah yang mengikat pasir dan agregat-agregat lain (Asroni, 2017). Material penyusunan beton secara umum dibedakan atas:

1. Semen sebagai bahan pengikat,
2. Agregat campuran yaitu bahan batu-batuan yang netral (tidak bereaksi) dan merupakan bentuk sebagian besar beton (misalnya: pasir, kerikil, batu pecah, *basalt*) sebagai bahan pengisi dan bahan yang diikat oleh pasta semen,
3. Air,
4. Bahan tambahan (*admixtures*) yaitu bahan kimia tambahan yang dimasukkan ke dalam spesi beton dan/atau beton untuk mengubah sifat beton yang dihasilkan misalnya *accelerator*, *retarder*, dan sebagainya.

Beton dirancang untuk menahan gaya tekan sehingga untuk menilai kinerja utama beton ini disebut kekuatan tekan atau kuat tekan beton (f'_c) yaitu kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per satuan luas, dan dinyatakan dengan MPa atau N/mm^2 .

Acuan untuk menentukan pemilihan beton didasarkan pada kuat tekan beton (f'_c) dimana terdapat batasan minimum untuk nilai tersebut berdasarkan Pasal 19.2.1 SNI 2847:2019 di antaranya untuk struktur bersifat umum yaitu 17 MPa, sedangkan jika struktur untuk kegunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SPRMK) yaitu 21 MPa. Jika untuk batas minimum terdapat ketentuannya, namun untuk batas maksimum dari mutu kuat tekan beton tidak ditentukan.

2.4.2 Material Tulangan Baja

Tulangan (*reinforcement*) menurut SNI 2847:2019 adalah elemen baja atau elemen yang ditanam dalam beton dan memenuhi persyaratan batang dan kawat nonprategang serta tulangan *stud* geser berkepala.

Tulangan ini diperlukan untuk membantu beton dalam menahan gaya tarik. Penulangan beton menggunakan bahan baja memiliki sifat teknis yang kuat dalam menahan gaya tarik. Menurut SNI 2847:2019 disebutkan bahwa tulangan

pada elemen beton bertulang yang diperhitungkan hanya baja tulangan dan kawat baja. Terdapat dua jenis baja tulangan yaitu tulangan ulir yang umumnya digunakan untuk tulangan longitudinal dan tulangan polos sebagai tulangan geser. Selain itu, tulangan baja ini memiliki kode yang berurutan yaitu BJ yang berarti Baja, TP yaitu Tulangan Polos dan TD yaitu Tulangan Deformasi (Ulir). Selain itu, terdapat angka pada kode tulangan yang menyatakan batas leleh yang ditunjukkan pada Tabel 2.16 di bawah.

Tabel 2.16 Sifat Mekanis Baja Tulangan

Kelas Baja Tulangan	Kuat Luluh (YS)	Kuat Tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.	Diameter Pelengkung
	MPa	MPa	%	mm
BjTP 280	Min 280 Maks 405	Min 350	11 ($d \leq 10$ mm)	3,5d ($d \leq 16$ mm)
			12 ($d \leq 12$ mm)	5d ($d \leq 19$ mm)
BjTS 280	Min 280 Maks 405	Min 350	11 ($d \leq 10$ mm)	3,5d ($d \leq 16$ mm)
			12 ($d \leq 12$ mm)	5d ($d \leq 19$ mm)
BjTS 420	Min 420 Maks 545	Min 525	14 ($d \leq 19$ mm)	3,5d ($d \leq 16$ mm)
			12 ($22 \leq d \leq 36$ mm)	5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)
			10 ($d > 36$ mm)	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)
				9d ($d > 36$ mm)
BjTS 520	Min 520 Maks 564	Min 650	7 ($d \leq 25$ mm)	5d ($d \leq 25$ mm)
			6 ($d \geq 29$ mm)	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)
				9d ($d > 36$ mm)
BjTS 550	Min 550 Maks 675	Min 687,5	12 ($6 \leq d \leq 36$ mm)	3,5d ($6 \leq d \leq 16$ mm)
				5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)
				7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)
			10 ($d \geq 36$ mm)	9d ($d > 36$ mm)
BjTS 690	Min 690 Maks 815	Min 805	10	3,5d ($6 \leq d \leq 16$ mm)
				5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)
				7d ($29 \leq d \leq 36$ mm)
				9d ($d > 36$ mm)

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2024)

Pada baja tulangan, *preliminary design* ini merupakan proses awal dalam perencanaan struktur beton bertulang yang bertujuan untuk menentukan material tulangan berdasarkan spesifikasi teknis dan parameter desain. Berdasarkan kondisi permukaannya, baja tulangan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu baja tulangan polos dan baja tulangan ulir atau sirip. Baja tulangan ini dipilih berdasarkan mutu atau kekuatan lelehnya (*yield strength*), nilai faktor kuat lebih, dan nilai rasio kuat ultimit. Di dalam SNI 2847:2019 Pasal 20.2.2 telah diatur bahwa mutu maksimum tulangan ulir untuk sistem bangunan SRPMK baik bagi elemen lentur (balok) maupun elemen aksial (kolom) yaitu sebesar 420 MPa. Sedangkan untuk struktur lainnya yaitu sebesar 550 MPa. Batasan mutu ini digunakan untuk menghindari kegagalan *brittle* (rapuh) pada elemen beton sebelum baja tulangan mencapai kapasitas lelehnya yang dapat berpotensi mengurangi keselamatan struktur. Selain itu, dengan pembatasan mutu ini dapat memastikan baja memiliki kapasitas ragangan yang memadai untuk deformasi sebelum kegagalan. Dengan kata lain, adanya pembatasan ini dimaksudkan agar beton bertulang dapat berfungsi secara optimal dengan menghindari kegagalan-kegagalan yang bisa saja terjadi secara tiba-tiba, untuk meningkatkan daya tahan terhadap lingkungan dan untuk mengontrol biaya konstruksi.

2.4.3 Perencanaan Struktur Atas

2.4.3.1 Pelat

1. *Preliminary Design* Pelat

Salah satu komponen atau elemen struktur yang termasuk ke dalam sistem struktur yaitu pelat baik itu pelat lantai maupun pelat atap. Konstruksi pelat ini dapat direncanakan untuk dapat menyalurkan beban dalam satu arah atau disebut dengan pelat satu arah (*one way slab*) atau dapat juga menyalurkan beban dalam dua arah atau pelat dua arah (*two way slab*). Selain itu, untuk pelat satu arah hanya bertumpu pada dua sisinya dengan rasio panjang lebih dari dua kali lebar bentangnya atau $L/W > 2$. Sedangkan untuk pelat dua arah, bertumpu pada keempat balok pendukung di semua sisi dengan rasio panjang dan lebar bentang saling mendekati atau $L/W \leq 2$. Berdasarkan SNI 2847:2019 pada Pasal 7.3.1.1 disebutkan bahwa

untuk menentukan ketebalan minimum pada pelat satu arah beton bertulang dengan f_y 420 MPa dapat dilihat pada Tabel 2.17 di bawah.

Tabel 2.17 Ketebalan minimum pelat satu arah

Kondisi Tumpuan	H_{minimum}
Tumpuan sederhana	$\ell/20$
Satu ujung menerus	$\ell/24$
Kedua ujung menerus	$\ell/28$
Kantilever	$\ell/10$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Sedangkan untuk tebal pelat minimum dua arah menurut SNI 2847:2019 pada Pasal 8 yaitu sebagai berikut:

$$a_f = \frac{E_{cb} I_b}{E_{cs} I_s} \quad (2.40)$$

- Untuk $a_{fm} \leq 0,2$, maka ketebalan pelat minimum yaitu sebagai berikut:
 - Pelat tanpa drop panel : 125 mm
 - Pelat dengan drop panel : 100 mm
- Untuk $0,2 < a_{fm} \leq 2,0$, maka ketebalan pelat minimum merupakan nilai yang terbesar antara 125 mm atau hasil dari persamaan berikut:

$$h = \frac{\ell_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)} \quad (2.41)$$

- Untuk $a_{fm} \geq 2,0$, maka ketebalan pelat minimum merupakan nilai terbesar antara 90 mm atau hasil dari persamaan berikut:

$$h = \frac{\ell_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta} \quad (2.42)$$

Keterangan:

- a_f = Rasio kekakuan balok terhadap pelat pada bentang panjang tinjauan
 a_{fm} = Nilai rata-rata a_f untuk semua balok
 E_{cb} = Modulus elastisitas balok beton (MPa)

- E_{cs} = Modulus elastisitas pelat beton (MPa)
 I_b = Momen Inersia balok (mm^4)
 I_s = Momen Inersia pelat (mm^4)
 β = Rasio bentang bersih dalam satu arah memanjang terhadap arah memendek dari pelat dua arah dengan $\beta = L_{ny}/L_{nx}$
 ℓ_n = Bentang bersih dalam arah panjang (dari muka balok ke muka balok berikutnya) (mm)

2. Penulangan Pelat

Untuk perhitungan kebutuhan tulangan pelat, dihitung kebutuhan tulangan lentur atau pokok dan tulangan bagi. Tulangan lentur dipasang pada dua arah yang saling tegak lurus. Luas tulangan lentur minimum, $A_{s,min}$, menurut SNI 2847:2019 Pasal 7.6.1.1 dapat dilihat pada Tabel 2.18

Tabel 2.18 Nilai Luas Tulangan Lentur Minimum

Tipe Tulangan	f_y , MPa	$A_{s,min}$	
Batang Ulir	< 420	$0,0020A_g$	
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	Terbesar dari:	$\frac{0,0018 \cdot 420}{f_y} A_g$
			$0,0014A_g$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Sedangkan untuk jarak tulangan maksimum, s , dalam Pasal 7.7.2.3 SNI 2847:2019 disebutkan bahwa jarak untuk tulangan ulir harus kurang dari $2h$ dan 450 mm untuk pelat dua arah. Sedangkan untuk jarak tulangan minimum berdasarkan Pasal 25.2 untuk tulangan yang sejajar pada satu lapis harus tidak dari nilai terbesar antara 25 mm, d_b , dan $(4/3)d_{agg}$. Sedangkan untuk tulangan sejajar pada dua atau lebih lapisan horizontal, maka tulangan pada lapisan atas harus diletakkan tepat di atas tulangan lapisan bawah dengan jarak bersih paling sedikit 25 mm.

2.4.3.2 Balok

1. Preliminary Design Balok

Untuk menentukan dimensi balok, dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.3.1 terdapat ketentuan untuk menentukan dimensi tinggi balok minimum dengan beton mutu normal dan tulangan mutu 420 MPa, dimana disebutkan bahwa ketebalan keseluruhan pelat h tidak boleh kurang dari batas minimum pada Tabel 2.19.

Tabel 2.19 Tinggi Balok Minimum

Kondisi Perletakan	Minimum h
Perletakan sederhana	$l/16$
Menerus satu sisi	$l/18,5$
Menerus dua sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Berdasarkan Chu-Kia Wang & Salmon, rasio antara tinggi dan lebar memakai rumus pendekatan yaitu $h/b = 1,5$ s/d 2 . Sedangkan pada Pasal 18.6.2 disebutkan untuk batasan dimensi balok harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:

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

Balok berfungsi untuk menahan gaya lentur dan geser yang disertai dengan atau tanpa gaya aksial atau torsi. Selain itu, balok dalam rangka momen merupakan bagian yang menahan gaya lateral umumnya komponen horizontal. Balok ini menyalurkan beban yang terdistribusi dari pelat lantai ke kolom dalam bentuk gaya dan momen.

2. Tulangan Lentur Balok

Gaya tarik akan menyebabkan beton mengalami retak, oleh karena itu dibutuhkan tulangan baja untuk memikul tegangan tarik yang diakibatkan oleh momen lentur, gaya aksial ataupun efek susut pada beton. Karena momen lentur

yang timbul merupakan momen positif, maka pada sisi bawah balok akan timbul tegangan lentur tarik serta retak-retak minor. Maka tulangan memanjang dibutuhkan untuk dapat memikul tegangan tarik dan diletakkan pada sisi bawah balok. Karena momen di tengah bentang lebih besar daripada di daerah sekitar tumpuan, maka di daerah tengah bentang dibutuhkan tulangan yang lebih banyak.

Selain tulangan memanjang untuk memikul momen lentur balok, dibutuhkan juga tulangan dalam arah transversal atau biasa disebut sengkang atau tulangan geser. Dimana tulangan geser ini dipasang untuk memikul gaya geser pada balok.

Dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1 disebutkan mengenai tulangan lentur minimum pada balok nonprategang yaitu sebagai berikut:

- Luas minimum tulangan lentur $A_{s,min}$, harus disediakan pada tiap penampang dimana tulangan tarik dibutuhkan sesuai analisis.
- $A_{s,min}$ harus lebih besar dari persamaan dan kecuali pada disediakan pada poin berikutnya. Untuk balok statis tertentu dengan sayap dalam keadaan tarik, nilai b_w harus lebih kecil dari b_f dan $2b_w$.

$$A_{s,min} = \frac{0,25\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \quad (2.43)$$

$$A_{s,min} = \frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.44)$$

Keterangan:

A_s = Luas tulangan tarik longitudinal (mm^2)

$A_{s,min}$ = Luas minimum tulangan lentur (mm^2)

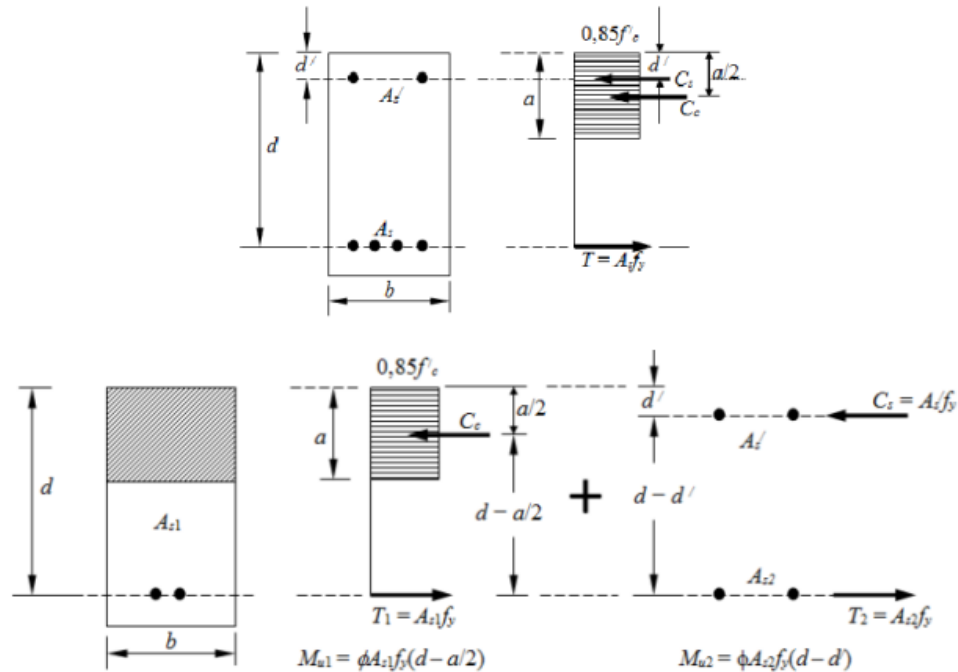
b_w = Lebar komponen struktur lentur (mm)

d = Tinggi efektif penampang komponen struktur lentur (mm)

- Jika A_s disediakan pada setiap penampang sekurang-kurangnya sepertiga lebih besar dari A_s analisis, maka poin 1 dan 2 tidak perlu dipenuhi.

Berdasarkan kebutuhan tulangannya, balok dapat bertulangan tunggal ataupun bertulangan rangkap. Balok bertulangan rangkap merupakan suatu penampang balok beton bertulang yang didesain memiliki tulangan tarik dan tekan.

Keuntungan dari menambahkan tulangan tekan pada penampang beton bertulang di antaranya untuk mengurangi lendutan jangka panjang, meningkatkan daktilitas, menghasilkan keruntuhan tarik pada struktur, serta dapat mengurangi rangkak dan susut pada balok.



Gambar 2.14 Konsep Balok Bertulangan Rangkap

(Sumber: Setiawan, 2016)

Balok bertulangan rangkap memiliki tulangan tarik (A_s) dan tulangan tekan (A_s'). Notasi d' merupakan jarak titik berat tulangan tekan (A_s') terhadap serat tekan terluar dari penampang balok. Sedangkan notasi ϵ_s menunjukkan regangan tulangan tekan. Untuk mempermudah proses analisa tulangan rangkap, mekanisme tegangan-regangan balok bertulangan rangkap dibagi menjadi dua kondisi, yaitu sebagai berikut:

a. Kondisi 1

Pada kondisi 1 ini, belum diperhitungkan tulangan tekan dalam kontribusi kekuatan. Notasi T_1 untuk menandakan gaya tarik pada kondisi 1. Dikarenakan gaya tarik dibagi menjadi dua maka menjadi T_1 dan T_2 . Sehingga $T = T_1 + T_2$.

$$T_1 = A_{s1} f_y \quad (2.45)$$

Gaya tekan beton (C_c)

$$C_c = 0,85 f'_c b a \quad (2.46)$$

Dengan $T_1 = C_c$, sehingga dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$M_{n1} = T_1 \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.47)$$

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.48)$$

Sehingga untuk persamaan tulangan tarik dapat ditulis sebagai berikut:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.49)$$

b. Kondisi 2

Parameter yang digunakan untuk kondisi 2 yaitu gaya tekan (C_s) yang berasal dari tulangan tekan (A'_s) dan gaya tarik dari tulangan tarik (A_{s1}). Pada kondisi 2 ini, lengan momen antara gaya tekan (C_s) dan gaya tarik (T_1) menjadi $(d - d')$. Di bawah ini merupakan persamaan-persamaan untuk kondisi 2.

Gaya tulangan tarik (A_{s2}):

$$T_s = A_{s2} f_y \quad (2.50)$$

Gaya tekan dari tulangan tekan (C_s):

$$C_s = A'_s f'_s \quad (2.51)$$

Dimana $T_2 = C_s$ dan f'_s merupakan tegangan leleh pada tulangan tekan (A'_s). Sehingga momen nominal pada kondisi 2 yaitu sebagai berikut:

$$M_{n2} = T_2 (d - d') \quad (2.52)$$

$$M_{n2} = A_{s2} f_y (d - d') \quad (2.53)$$

Dimana tulangan tekan dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$A'_s = A_{s2} \quad (2.54)$$

Sehingga berdasarkan persamaan kondisi 1 dan kondisi 2 dapat diperoleh nilai momen nominal (M_n) untuk balok tulangan rangkap yaitu sebagai berikut:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.55)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.56)$$

Dengan nilai C_c

$$T = C_c + C_s \quad (2.57)$$

$$C_c = C_s - T = (A'_s f'_s) - (A_s f_y) \quad (2.58)$$

Maka didapat persamaan momen nominal sebagai berikut:

$$M_n = (A'_s f'_s) - (A_s f_y) \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s f'_s) (d - d') \quad (2.59)$$

Dengan syarat harus memenuhi $\phi M_n > M_u$, dengan ϕ bernilai 0,9 sebagai kontrol tarik.

3. Tulangan Geser Balok

Saat balok sederhana diberi beban merata, maka akan muncul momen lentur dan gaya geser secara bersamaan. Sehingga untuk memikul beban tersebut dengan aman, maka balok harus didesain terhadap kedua macam gaya tersebut. Apabila tulangan geser ini tidak dipasang, maka kegagalan geser akan terjadi yang ditandai dengan adanya lendutan kecil, kurangnya daktilitas yang akan mengakibatkan keruntuhan struktur yang terjadi secara tiba-tiba. Maka dari itu, berikut merupakan persamaan-persamaan untuk menentukan kuat geser pada balok:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.60)$$

Dimana:

V_n = Gaya geser nominal balok (N)

V_c = Kemampuan yang dimiliki balok beton untuk menahan geser (N)

V_s = Gaya geser yang tidak mampu ditahan oleh balok (N)

Berdasarkan SNI 2847:2019 dalam Pasal 22.5.5.5, nilai V_c dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.61)$$

Keterangan:

f'_c = Kuat tekan beton (N/mm²)

b_w = Lebar efektif balok beton (mm)

d = Tinggi efektif balok beton (mm)

Jika penampang diperoleh nilai gaya geser ultimit, $V_u > \phi V_c$, maka berdasarkan Pasal 22.5.10.1 disebutkan bahwa tulangan geser harus dipasang dan harus memenuhi persyaratan berikut:

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.62)$$

Untuk memperoleh nilai V_s , dalam Pasal 22.5.10.3 dihitung dengan persamaan:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.63)$$

Keterangan:

A_v = Luas tulangan sengkang (mm²)

f_{yt} = Kuat tarik baja tulangan (N/mm²)

s = Jarak antar tulangan sengkang (mm)

Dengan gaya geser maksimum yang dipikul oleh tulangan geser (V_s) yaitu sebagai berikut:

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.64)$$

Namun jika nilai V_s melebihi gaya geser maksimum, maka penampang harus diperbesar. Sedangkan untuk spasi maksimum tulangan geser telah diatur sebagaimana tercantum dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.7.6.2.2 yang dapat dilihat pada Tabel 2.20.

Tabel 2.20 Spasi Maksimum Tulangan Geser

V_s	Spasi Maksimum Balok Nonprategang (mm)	
$\leq 0,33\sqrt{f'_c}b_w d$	Terkecil dari:	$d/2$
		600
$> 0,33\sqrt{f'_c}b_w d$	Terkecil dari:	$d/4$
		300

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Selain itu, terdapat luas minimum tulangan sengkang pada balok ($A_{v,min}$) berdasarkan Pasal 9.6.3.3 kemudian diambil nilai terbesar dari persamaan berikut:

$$A_{vmin} = \frac{0,062\sqrt{f'_c}b_w s}{f_{yt}} \quad (2.65)$$

$$A_{vmin} = \frac{0,35b_w s}{f_{yt}} \quad (2.66)$$

Dalam menentukan tulangan geser balok, terdapat beberapa kategori yang didasarkan pada gaya geser ultimit di antaranya:

- Jika $V_u < 0,5\phi V_c$, maka balok tidak membutuhkan tulangan geser.
- Jika $0,5\phi V_c < V_u \leq \phi V_c$, maka dibutuhkan tulangan geser minimum dengan nilai V_s dan A_v yang digunakan merupakan nilai minimum.
- Jika $V_u > \phi V_c$, maka digunakan tulangan geser dengan mengambil nilai V_s dan A_v yang ada.

4. Tulangan Torsi Balok

Meskipun komponen struktur balok beton bertulang pada umumnya didesain untuk memikul momen lentur atau gaya geser. Namun tidak jarang dijumpai pada struktur balok memikul momen torsi yang cenderung memuntir balok dalam arah sumbu memanjang.

Berdasarkan Pasal 22.7.4.1 SNI 2847:2019, dilakukan terlebih dahulu pengecekan kebutuhan suatu balok terhadap tulangan torsi yang harus memenuhi syarat $T_u \geq \phi \frac{T_{cr}}{4}$. Untuk menentukan nilai T_{cr} dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$T_{cr} = 0,33\lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (2.67)$$

Keterangan:

T_{cr} = Momen retak torsi (Nmm)

T_u = Momen torsi terfaktor pada balok (Nmm)

ϕ = Faktor reduksi (0,75)

A_{cp} = Luas penampang (mm^2)

P_{cp} = Keliling penampang (mm)

λ = Faktor modifikasi beton ringan (dalam Tabel 25.4.2.4 SNI 2847:2019)

Untuk dimensi penampang berdasarkan Pasal 22.7.7.1 harus memenuhi syarat sebagai berikut:

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \Phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f'_c} \right) \quad (2.68)$$

Keterangan:

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

P_h = Keliling daerah dalam tulangan geser (mm)

Untuk tulangan geser yang dibutuhkan akibat torsi dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$A_t = \frac{T_u \cdot s}{\Phi \cdot 2 A_{oh} \cdot f_{yt}} \tan \theta \quad (2.69)$$

Dalam Pasal 9.6.4.2 SNI 2847:2019 telah diatur untuk luas tulangan transversal minimum jika tulangan torsi diperlukan, maka nilainya harus lebih besar antara dua persamaan berikut:

$$\left(\frac{A_v + 2A_t}{s} \right)_{\min} \geq 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.70)$$

$$\left(\frac{A_v + 2A_t}{s} \right)_{\min} \geq 0,032 \frac{b_w}{f_{yt}} \quad (2.71)$$

5. Syarat Desain Balok SRPMK

Untuk mendesain struktur SRPMK khususnya balok telah diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 18.6 sampai 18.9 dimana disebutkan bahwa dalam Pasal tersebut berlaku untuk balok sistem rangka pemikul momen khusus yang didesain untuk menahan geser dan lentur.

a. Batasan Dimensi Penampang

Berdasarkan Pasal 18.6.2 disebutkan bahwa untuk batasan dimensi balok harus memenuhi persyaratan berikut:

- 1) Bentang bersih, ℓ_n , harus minimal $4d$.
- 2) Lebar penampang, b_w , harus diambil nilai terkecil antara $0,3h$ dan 250mm.
- 3) Lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil antara lebar kolom, c_2 , dan 0,75 kali dimensi kolom dalam arah sejajar komponen lentur, $0,75c_1$, pada masing-masing sisi kolom.

b. Syarat Tulangan Lentur

Untuk tulangan lentur harus memenuhi ketentuan yang tertera dalam Pasal 18.6.3.1 berikut:

- 1) Balok harus memiliki minimal dua tulangan pada sisi atas maupun sisi bawah.
- 2) Luas tulangan (A_s) tidak boleh kurang dari persamaan berikut:

$$\frac{0,25\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \quad (2.72)$$

$$\frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.73)$$

Dari kedua persamaan tersebut, diambil yang terbesar namun nilainya tidak boleh melebihi nilai dari persamaan berikut:

$$A_s \leq 0,025b_w d \quad (2.74)$$

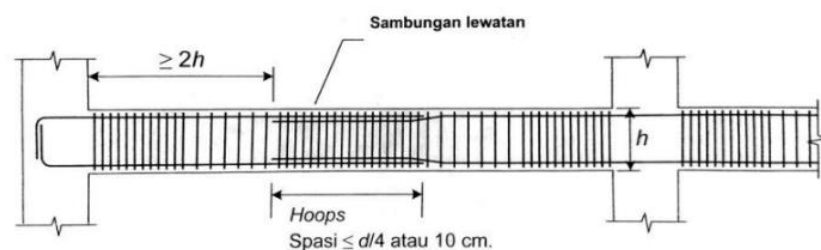
- 3) Kekuatan momen lentur harus memenuhi Pasal 18.6.3.2 dimana telah diatur bahwa kuat lentur positif komponen struktur lentur pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari setengah kuat lentur momen negatif pada muka kolom.

$$M_n(+)\geq \frac{1}{2}M_n(-) \quad (2.75)$$

- 4) Sedangkan untuk semua momen lentur balok harus lebih besar seperempat momen maksimum di kedua tumpuan.

$$M_n(+)\text{ atau }M_n(-)\geq \frac{1}{4}M_{\max} \quad (2.76)$$

- 5) Sambungan lewatan tulangan longitudinal diizinkan apabila sengkang pengekan atau spiral dipasang sepanjang sambungan lewatan. Jarak antar tulangan transversal tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $d/4$ dan 100 mm. Serta sambungan lewatan tidak boleh digunakan dalam jarak $2h$ dari muka kolom.



Gambar 2.15 Syarat Sambungan Lewatan

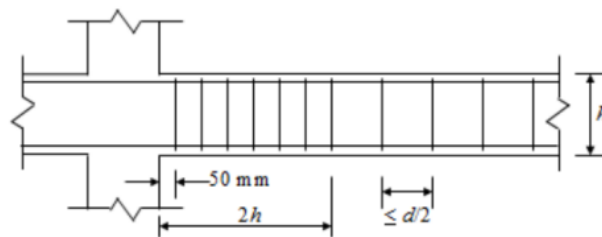
(Sumber: Imran & Hendrik, 2019)

c. Syarat Tulangan Transversal

Tulangan transversal dipasang atau direncanakan dengan tujuan agar mampu memberikan kekangan lateral bagi tulangan lentur dan membantu beton dalam memikul gaya geser (Setiawan, 2016). Menurut SNI

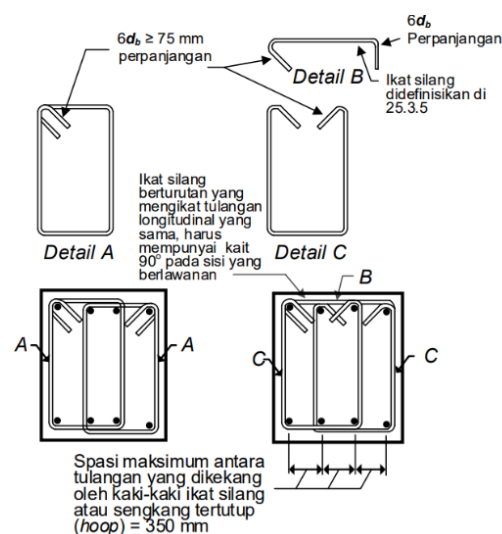
2847:2019 Pasal 18.6.4 terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi dalam perencanaan tulangan transversal, diantaranya:

- 1) Sengkang pengekang harus dipasang pada daerah hingga dua kali tinggi balok diukur dari muka kolom hingga ke tengah bentang balok, di kedua ujung balok.
- 2) Sengkang pertama harus ditempatkan tidak lebih dari 50 mm dari muka kolom dan jarak antar sengkang tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $d/4$, $6d_b$, dan 150 mm.
- 3) Sengkang harus dipasang dengan jarak tidak lebih dari $d/2$ di sepanjang bentang balok di luar daerah $2h$.



Gambar 2.16 Syarat Tulangan Transversal
(Sumber: Imran & Hendrik, 2019)

- 4) Sengkang tertutup dapat dipasang sebagai tulangan tunggal atau tertutup.



Gambar 2.17 Sengkang Tertutup Dipasang Bertumpuk
(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

- 5) Senggang tertutup dan ikat silang harus diberi kait gempa pada setiap ujungnya. Yang dimaksud dengan ikat silang yaitu tulangan pengikat yang ujungnya diberi kait gempa dan kait 90°.

d. Kuat Geser

Dalam Pasal 18.6.5 SNI 2847:2019 telah diatur mengenai persyaratan kekuatan geser pada balok SRPMK yaitu harus didesain untuk dapat memikul gaya geser rencana, V_c , yang ditimbulkan oleh kuat lentur maksimum, M_{pr} , dengan tanda berlawanan yang dianggap bekerja pada muka-muka tumpuan. Komponen struktur tersebut dianggap memikul beban gravitasi terfaktor pada daerah sepanjang bentang. Dimana M_{pr} merupakan kuat momen lentur pada ujung balok yang ditentukan dengan menganggap kuat tarik pada tulangan memanjang minimum sebesar $1,25f_y$ dan faktor reduksi bernilai 1.

$$M_{pr} = A_s (1,25f_y) \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.77)$$

Dimana nilai a yaitu sebagai berikut:

$$a = \frac{A_s (1,25f_y)}{0,85f'_c b} \quad (2.78)$$

Gaya geser rencana dapat diasumsikan dengan saat gempa terjadi maka struktur dianggap mengalami goyangan baik ke kiri maupun ke kanan. Sehingga persamaan untuk menghitung gaya geser yaitu sebagai berikut:

$$V_{ki} = \frac{M_{pr}^- + M_{pr}^+}{I_n} + \frac{q_u I_n}{2} \quad (2.79)$$

$$V_{ka} = \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^+}{I_n} + \frac{q_u I_n}{2} \quad (2.80)$$

Keterangan:

M_{pr} = Kuat momen lentur di ujung balok

- V_c = Gaya geser desain
 I_n = Panjang bentang bersih balok
 q_u = Pengaruh beban gravitasi = $1,2D + 1,0L$

Dalam Pasal 18.6.5.2 disebutkan bahwa kuat geser pada beton (V_c) dapat diambil sama dengan nol apabila gaya geser akibat gempa lebih besar atau 50% dari kuat geser perlu maksimum dalam bentang tersebut. Selain itu, gaya tekan aksial terfaktor P_u termasuk pengaruh gempa kurang dari $A_g f'_c / 20$.

2.4.3.3 Kolom

Kolom merupakan komponen utama dari suatu bangunan yang memikul beban lateral pada gedung untuk disalurkan ke fondasi. Menurut SNI 2847:2019, kolom juga merupakan bagian sistem rangka pemikul gaya lateral menahan kombinasi beban aksial, momen dan geser.

1. *Preliminary Design* Kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 pada Pasal 18.7.2 terdapat aturan terkait batasan dimensi untuk elemen kolom. Dimana menurut Pasal 18.7.2.1 disebutkan bahwa kolom-kolom harus memenuhi dua persyaratan, yaitu sebagai berikut:

- Untuk dimensi penampang terkecil diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri yang tidak kurang dari 300 mm.
- Untuk rasio penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

Selain itu, terdapat persamaan untuk melakukan pendekatan dimensi kolom, yaitu sebagai berikut:

$$A_g \geq \frac{P_u}{0,3 f'_c} \quad (2.81)$$

Keterangan:

- A_g = Luas penampang kolom (mm^2)
 P_u = Beban aksial total yang bekerja pada kolom (N)

2. Kondisi Aksial Tekan Sentris

Berdasarkan SNI 2847:2019, apabila kolom diberi pembebanan aksial dengan P_0 seperti pada Gambar 2.18, maka sesuai dengan Pasal 22.4.2.2 disebutkan bahwa untuk nilai P_0 tersebut dapat dihitung dengan persamaan berikut:

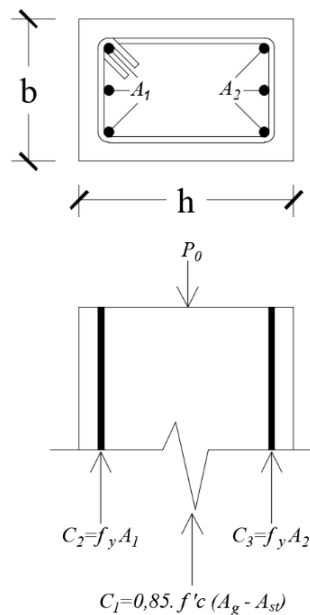
$$P_0 = 0,85f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y \quad (2.82)$$

Keterangan:

A_g = luas penampang kolom, $b \times h$

A_{st} = luas total tulangan longitudinal, $A_1 + A_2$

Sedangkan untuk faktor 0,85 merupakan perbandingan antara kuat tekan kolom dengan kuat tekan tes silinder. Dimana untuk nilai kuat nominal yang digunakan dalam desain tidak boleh melebihi $0,8P_0$.



Gambar 2.18 Kolom dengan Beban Aksial Tekan

3. Kondisi Regangan Berimbang

Kondisi regangan berimbang merupakan suatu kondisi dimana kapasitas lentur kolom tercapai ketika baja tulangan dan beton sama-sama mencapai kondisi regangan maksimum yang dapat diterima sebelum terjadi keruntuhan. Dalam kondisi ini, regangan pada baja mencapai regangan leleh ($\epsilon_y = f_y/E_s$) dan regangan pada serat terluar beton mencapai regangan ultimit beton ($\epsilon_c = 0,003$).

$$T = A_s f_y \quad (2.88)$$

$$C_s = A'_s (f'_s - 0,85 f'_c) \quad (2.89)$$

Sehingga persamaan kesetimbangan dalam arah horizontal yaitu sebagai berikut:

$$P_b = 0,85 f'_c a_b b + A'_s (f'_s - 0,85 f'_c) - A_s f_y \quad (2.90)$$

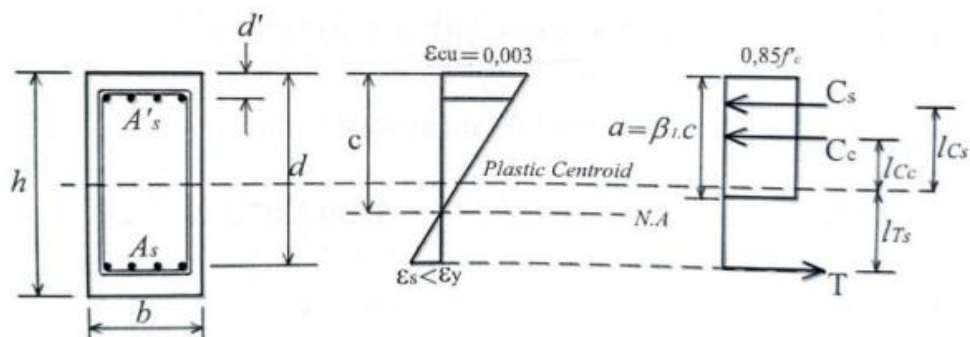
Persamaan untuk momen dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$M_b = P_b e_b \quad (2.91)$$

$$M_b = C_c \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + T d'' \quad (2.92)$$

4. Kondisi Keruntuhan Tekan

Kondisi keruntuhan tekan, terjadi apabila gaya tekan P_n melebihi gaya tekan dalam kondisi seimbang P_b atau apabila eksentrisitas, $e = M_n/P_n$ lebih kecil daripada eksentrisitas pada kondisi seimbang, e_b . Pada kondisi ini, regangan beton akan mencapai 0,003, sedangkan regangan tulangan baja akan kurang dari ϵ_y . Sehingga sebagian besar penampang beton akan berada dalam keadaan tekan. Sumbu netral akan bergerak mendekati tulangan tarik, menambah luas daerah tekan beton, sehingga jarak sumbu netral dari serat tekan beton akan melebihi jaraknya pada kondisi seimbang ($c > c_b$). Ilustrasi kolom dengan kondisi keruntuhan tekan dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Kondisi Keruntuhan Tekan

(Sumber: Lesmana, 2020)

Untuk kondisi ini, persamaan tegangan-tegangan tulangan tarik yaitu sebagai berikut:

$$\epsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) \epsilon_{cu} \quad (2.93)$$

Jika nilai $\epsilon_s > \epsilon_y$ maka tulangan leleh dan sesuai dengan kondisi *tension controlled*. Maka persamaan tegangan pada tulangan tarik menjadi sebagai berikut:

$$f_s = f_y \quad (2.94)$$

Sedangkan persamaan regangan pada tulangan tekan yaitu sebagai berikut:

$$\epsilon'_s = \left(\frac{c-d'}{c} \right) \epsilon_{cu} \quad (2.95)$$

Jika nilai $\epsilon'_s < \epsilon_y$ maka tulangan tidak leleh dan sesuai dengan kondisi *tension controlled*. Maka persamaan tegangan pada tulangan tekan menjadi sebagai berikut:

$$f'_s = \epsilon'_s E_s \quad (2.96)$$

Gaya tekan dari tulangan tekan dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$A'_s = n \frac{1}{4} \pi D_2^2 \quad (2.97)$$

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85 f'_c) \quad (2.98)$$

Persamaan gaya tarik dari tulangan tarik dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$T = A_s \cdot f_y \quad (2.99)$$

Sedangkan gaya tekan dari beton yaitu sebagai berikut:

$$C_c = 0,85 f'_c a b \quad (2.100)$$

Kapasitas aksial tekan nominal dalam kondisi *tension controlled* dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_n = C_c + C_s - T \quad (2.101)$$

Persamaan untuk kapasitas momen nominal dalam kondisi *tension controlled* yaitu sebagai berikut:

$$M_n = C_c \left(\frac{d}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{d}{2} - d_s' \right) + T_s \left(\frac{d}{2} - d_s \right) \quad (2.102)$$

5. Desain Geser Kolom

Persamaan desain dan ketahanan geser kolom yang terjadi mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 22.5.6.1 dimana nilai V_c untuk komponen yang menerima beban geser dan aksial yaitu sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.103)$$

Sedangkan untuk kebutuhan tulangan geser kolom harus memenuhi persamaan berikut:

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.104)$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser terfaktor

N_u = Gaya aksial terfaktor

λ = 1,0 (beton normal)

d = 0,8h

ρ_w = Rasio as terhadap $b_w d$

6. Syarat Desain Kolom SRPMK

Kolom dengan sistem rangka pemikul momen khusus didesain untuk menahan gaya lentur, geser, dan aksial. Syarat desain untuk kolom SRPMK ini berdasar pada Pasal 18.7 dalam SNI 2847:2019. Dimana kolom harus didesain agar lebih kuat dari balok.

a. Syarat Dimensi Penampang Kolom

Berdasarkan Pasal 18.7.2.1 disebutkan bahwa dimensi kolom harus memenuhi persyaratan 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.

b. Syarat Kuat Lentur Kolom

Untuk kekuatan lentur minimum kolom berdasarkan Pasal 18.7.3.2, harus memenuhi persamaan berikut:

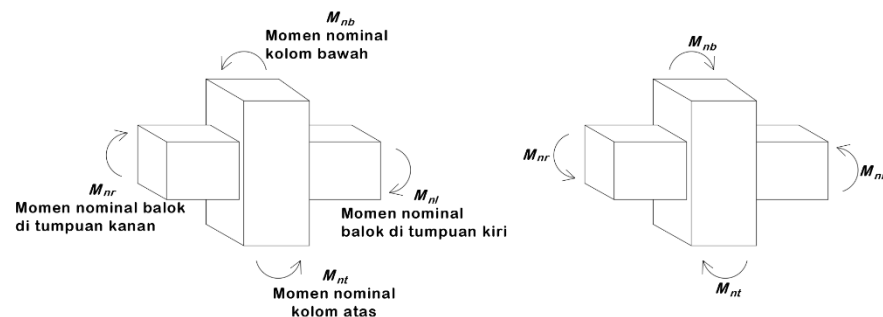
$$\Sigma M_{nc} \geq (1,2) \Sigma M_{nb} \quad (2.105)$$

Keterangan:

ΣM_{nc} = jumlah kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*.

ΣM_{nb} = jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam *joint*, yang dievaluasi di muka-muka *joint*.

Tujuan dari persamaan tersebut yaitu untuk mengurangi kemungkinan leleh pada kolom yang dianggap sebagai bagian dari sistem pemikul gaya seismik. Menurut SNI 2847:2019, jika kolom tidak lebih kuat dari balok yang merangka pada *joint*, ada kemungkinan peningkatan aksi inelastik. Maka dari itu, kolom SRPMK harus memenuhi ketentuan kolom kuat balok lemah, *Strong Column Weak Beam* (SCWB).



Gambar 2.21 Konsep Kolom Kuat Balok Lemah

(Sumber: Imran & Hendrik, 2019)

c. Syarat Tulangan Longitudinal

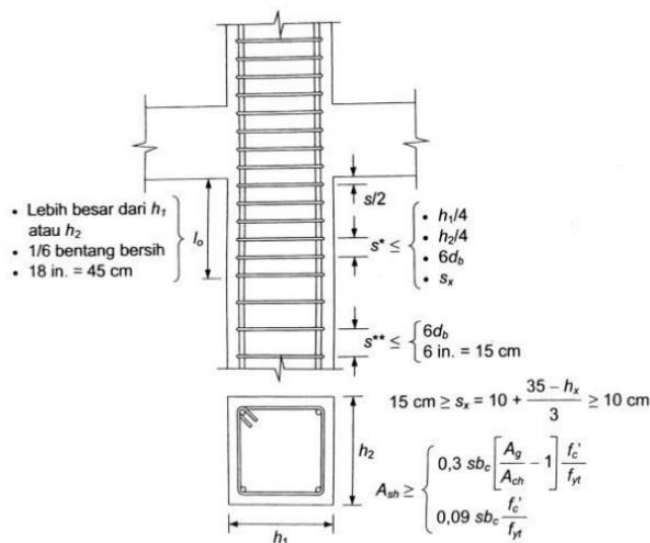
Dalam Pasal 18.7.4 SNI 2847:2019 disebutkan bahwa syarat tulangan longitudinal atau lentur untuk kolom yaitu sebagai berikut:

- 1) Luas tulangan longitudinal, A_{st} , tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$.
- 2) Pada kolom-kolom dengan sengkang bundar, jumlah batang tulangan longitudinal minimum harus 6.
- 3) Sambungan mekanis harus memenuhi Pasal 18.2.7 dan sambungan las pada Pasal 18.2.8 SNI 2847:2019. Sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom dan harus didesain sebagai sambungan lewatan tarik dan harus dilingkupi tulangan transversal yang harus memenuhi Pasal 18.7.5.2 dan Pasal 18.7.5.3.

d. Syarat Tulangan Transversal

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.1 disebutkan bahwa tulangan transversal harus dipasang sepanjang l_0 seperti pada Gambar 2.22. Panjang l_0 tidak boleh kurang dari nilai terbesar antara:

- 1) Tinggi kolom pada muka *joint* atau pada penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
- 2) Seperenam tinggi bersih kolom.
- 3) 450 mm.

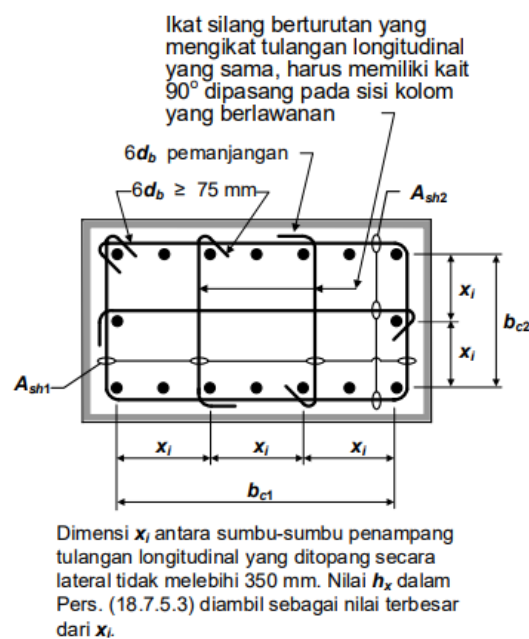


Gambar 2.22 Tulangan Transversal

(Sumber: Imran & Hendrik, 2019)

Menurut Pasal 18.7.5.2, tulangan transversal harus sesuai dengan ketentuan sebagai berikut:

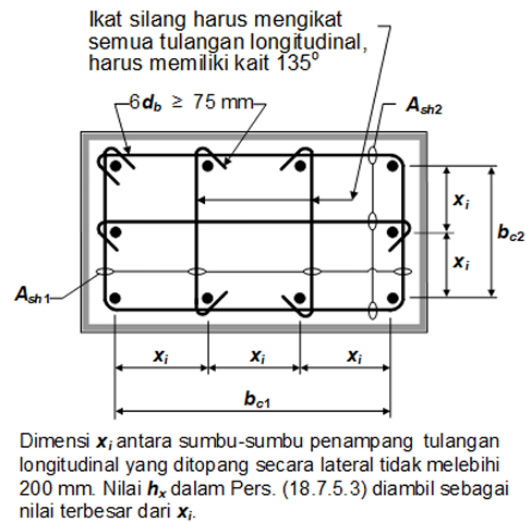
- 1) Tulangan transversal pada kolom harus terdiri dari spiral tunggal atau spiral saling tumpang (*overlap*), sengkang pengekang bundar, atau sengkang pengekang persegi, dengan atau tanpa ikat silang.
- 2) Setiap tekukan ujung sengkang pengekang persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar.
- 3) Ikat silang yang berurutan harus diselang-seling ujungnya sepanjang tulangan longitudinal dan sekeliling perimeter penampang.
- 4) Tulangan harus diatur sedemikian rupa sehingga spasi h_x antara tulangan longitudinal di sepanjang perimeter penampang kolom yang tertumpu secara lateral oleh sudut ikat silang atau kaki-kaki sengkang pengekang tidak boleh melebihi 350 mm.



Gambar 2.23 Contoh Penulangan Transversal pada Kolom

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

- 5) Ketika $P_u > 0,3A_g f_c'$ atau $f_c' > 70$ MPa maka setiap tulangan longitudinal harus diberi pengikat ataupun kait dan nilai h_x tidak boleh lebih dari 200 mm.



Gambar 2.24 Contoh Penulangan Transversal pada Kolom dengan

$$P_u > 0,3 A_g f'_c \text{ atau } f'_c > 70 \text{ MPa}$$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

e. Jarak Tulangan Transversal pada Daerah ℓ_0

Menurut SNI 2847:2019 dalam Pasal 18.7.5.3 disebutkan bahwa spasi untuk tulangan transversal tidak boleh melebihi nilai terkecil dari:

- 1) Seperempat dimensi terkecil dari penampang kolom.
- 2) Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil.
- 3) Nilai S_o tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak boleh kurang dari 100 mm, nilai S_o didapat dari persamaan:

$$S_o = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{3} \right) \quad (2.106)$$

Selain itu, untuk tulangan transversal juga dapat diperoleh dari Pasal 18.7.5.4 pada Tabel 2.21.

Tabel 2.21 Tulangan Transversal untuk Kolom SRPMK

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang berlaku	
A_{sh}/sb_c	$P_u \leq 0,3 A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (a) dan (b)	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (a)$

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang berlaku	
untuk sengkang pengeang persegi	$P_u > 0,3 A_g f_c'$ atau $f_c' > 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (a), (b) dan (c)	$0,09 \frac{f_c'}{f_{yt}} \quad (b)$ $0,2 k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}} \quad (c)$
ρ_s untuk spiral ataupun sengkang pengeang lingkaran	$P_u \leq 0,3 A_g f_c'$ dan $f_c' \leq 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (d) dan (e)	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yt}} \quad (d)$
	$P_u > 0,3 A_g f_c'$ atau $f_c' > 70 \text{ MPa}$	Terbesar antara (d), (e) dan (f)	$0,09 \frac{f_c'}{f_{yt}} \quad (e)$ $0,35 k_f \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}} \quad (f)$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Dengan nilai faktor kekuatan beton k_f dan faktor keefektifan pengeangan k_n dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$k_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 \geq 1,0 \quad (2.107)$$

$$k_n = \frac{n_\ell}{n_\ell - 2} \quad (2.108)$$

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

f. Jarak Tulangan Transversal pada Daerah di Luar ℓ_0

Dalam Pasal 18.7.5.5 SNI 2847:2019, untuk daerah di luar panjang ℓ_0 , kolom harus diberi tulangan spiral atau sengkang dengan spasi s tidak melebihi nilai terkecil dari enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil dan 150 mm, kecuali bila jumlah tulangan transversal yang lebih besar yang disyaratkan dalam Pasal 18.7.4.3 atau 18.7.6 SNI 2847:2019.

g. Kekuatan Geser

Berdasarkan SNI 2847:2019 dalam Pasal 18.7.6.1.1 disebutkan bahwa gaya geser desain V_e harus ditentukan dari peninjauan gaya-gaya maksimum yang dapat terjadi pada muka-muka *joint* pada setiap ujung kolom. Gaya-gaya *joint* ini harus ditentukan menggunakan kekuatan lentur maksimum yang mungkin terjadi, M_{pr} , di setiap ujung kolom yang terkait dengan rentang beban aksial terfaktor, P_u , yang bekerja pada kolom. Geser kolom tersebut tidak perlu melebihi nilai geser yang dihitung dari kekuatan *joint* berdasarkan M_{pr} balok yang merangka ke *joint*. Nilai V_e tidak boleh kurang dari geser terfaktor berdasarkan analisis struktur.

$$V_e = \frac{M_{prc\ a} + M_{prc\ b}}{l_c} \quad (2.109)$$

Keterangan:

$M_{prc\ a}$ = Kuat momen maksimum pada sisi atas kolom

$M_{prc\ b}$ = Kuat momen maksimum pada sisi bawah kolom

l_c = Panjang kolom yang ditinjau

Nilai M_{pr} untuk kolom ditentukan dengan menganggap kuat tarik pada tulangan memanjang sebesar minimum $1,25f_y$ dan faktor reduksi bernilai 1,0. Terdapat dua jenis sumber kekuatan geser saat memperhitungkan kekuatan geser yaitu dari penampang dan dari tulangan. Namun berdasarkan Pasal 18.7.6.2.1, tulangan transversal sepanjang ℓ_0 berdasarkan Pasal 18.7.5.1, harus didesain untuk menahan gaya geser dengan mengasumsikan $V_c = 0$, apabila terjadi dua keadaan berikut:

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

2.4.3.4 Hubungan Balok Kolom

Dalam SNI 2847:2019, *joint* merupakan bagian struktur yang dipakai bersama pada komponen struktur yang berpotongan. Termasuk perpotongan balok

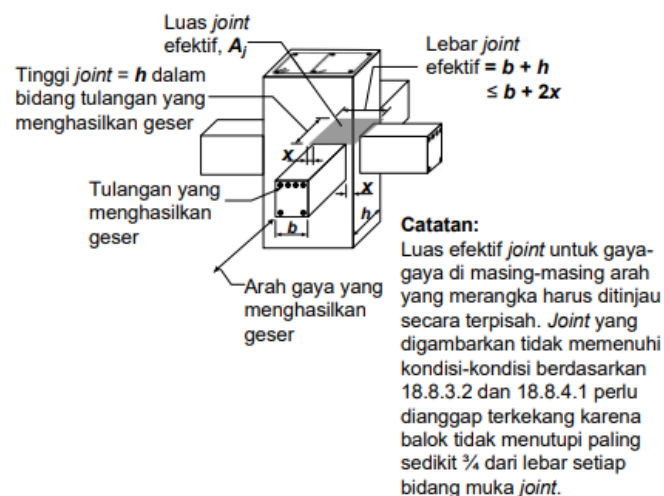
dan kolom yang disebut hubungan balok kolom (HBK). Jumlah tulangan yang digunakan untuk hubungan balok kolom sama dengan jumlah tulangan transversal pada ujung-ujung kolom. Namun berdasarkan Pasal 18.8.3.2 disebutkan bahwa jumlah tulangannya dapat direduksi setengahnya apabila terdapat balok yang merangka pada keempat sisi *joint* dengan spasi yang diizinkan ditingkatkan menjadi 150 mm dalam ketinggian balok, h , yang terendah yang merangka pada *joint*.

Luas efektif untuk hubungan balok kolom dapat dilihat pada Gambar 2.25 atau dapat dihitung berdasarkan Pasal 18.8.3.2 dengan persamaan sebagai berikut:

$$A_j = h_j b_j \quad (2.110)$$

Keterangan:

- A_j = Luas efektif *joint* (m^2)
 h_j = Panjang efektif *joint* (m)
 b_j = Lebar efektif *joint* (m)



Gambar 2.25 Luas *Joint* Efektif

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Pada Pasal 18.8.2.1 disebutkan bahwa gaya-gaya yang terdapat pada tulangan longitudinal balok pada muka *joint* harus dihitung dengan mengasumsikan tegangan pada tulangan tarik lentur adalah $1,25f_y$. Untuk gaya geser yang dihasilkan kolom dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$V_{col} = \frac{(M_{pr\ ba} DF_{ba}) + (M_{pr\ bb} DF_{bb})}{l_n} \quad (2.111)$$

Untuk nilai gaya geser yang terjadi pada hubungan balok kolom harus memenuhi syarat untuk tidak melebihi nilai kapasitas gesernya. Dalam Pasal 18.8.4.1 telah ditentukan untuk nilai V_n dapat dilihat pada Tabel 2.22, dengan nilai faktor beton, λ , diambil 0,75 untuk beton ringan dan 1,0 untuk beton normal.

Tabel 2.22 Kapasitas Geser Hubungan Balok Kolom

Konfigurasi <i>Joint</i>	V_n
Untuk <i>joint</i> yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya.	$1,7\lambda \sqrt{f'_c} A_j$
Untuk <i>joint</i> yang terkekang oleh balok-balok pada tiga sisinya atau dua sisi berlawanan,	$1,2\lambda \sqrt{f'_c} A_j$
Untuk kasus-kasus lainnya	$1,0\lambda \sqrt{f'_c} A_j$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

2.4.3.5 Tangga

Tangga merupakan salah satu elemen struktur yang menghubungkan bagian antar lantai dengan beda ketinggian. Perencanaan tangga harus direncanakan dengan matang seperti lokasi penempatan tangga harus di tempat yang mudah dilihat dan dicapai serta harus mendapatkan penerangan yang cukup. Selain itu, guna menunjang tangga yang nyaman dan mudah dilewati serta tidak melelahkan, perencanaan tangga harus diperhitungkan. Berikut merupakan ketentuan perhitungan untuk perencanaan tangga.

1. Kemiringan tangga

Kemiringan tangga untuk gedung memiliki sudut kemiringan $30^\circ - 40^\circ$ dengan lebar untuk satu lintasan 70 – 80 cm dan untuk dua lintasan 120 – 150 cm sedangkan untuk lebih dari dua lintasan, lebar tangga berkisar antara 180 – 250 cm.

2. Anak tangga

Anak tangga terdiri dari dua bagian yaitu bagian lebar injakan atau *antrede* dan bagian tinggi tanjakan atau *optrede*. ukuran *antrede* berkisar antara 25 – 30 cm untuk bangunan umum, sedangkan untuk *optrede* berkisar antara 16 – 20 cm, hal ini guna menunjang kenyamanan orang saat menaiki tangga sehingga tidak mudah lelah. Ukuran anak tangga dapat ditentukan berdasarkan kontrol berikut:

- a. Kontrol berdasarkan ukuran langkah

$$2s + a = (60 - 65) \text{ cm} \quad (2.112)$$

- b. Kontrol berdasarkan keamanan

$$s + a = \pm 46 \text{ cm} \quad (2.113)$$

- c. Kontrol berdasarkan kenyamanan

$$a - s = \pm 12 \text{ cm} \quad (2.114)$$

Keterangan:

a = Lebar injakan (*antrede*) atau lebar anak tangga (cm)

s = Tinggi tanjakan (*optrede*) atau tinggi anak tangga (cm)

3. Jumlah Anak Tangga

Untuk menentukan jumlah anak tangga dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$n_s = \frac{h}{s} \quad (2.115)$$

$$n_a = n_s - 1 \quad (2.116)$$

Keterangan:

n_s = Jumlah *optrede*

n_a = Jumlah *antrede*

h = Tinggi bordes (m)

4. Tebal Pelat Tangga dan Pelat Bordes

Untuk menentukan tebal pelat baik itu pelat tangga maupun pelat bordes dapat dihitung berdasarkan SNI 2847:2019 dalam Pasal 7.3.1.1 atau dapat dilihat pada Tabel 2.17. Untuk panjang dan lebar bordes secara keseluruhan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$P_1 = n_t a \quad (2.117)$$

$$L_b = P - P_1 \quad (2.118)$$

$$P_m = \sqrt{P_1^2 + h_b^2} \quad (2.119)$$

$$l = P_m + L_b \quad (2.120)$$

Keterangan:

P = Panjang area tangga rencana (cm)

P_1 = Panjang tangga horizontal (cm)

L_b = Lebar bordes (cm)

h_b = Tinggi bordes (cm)

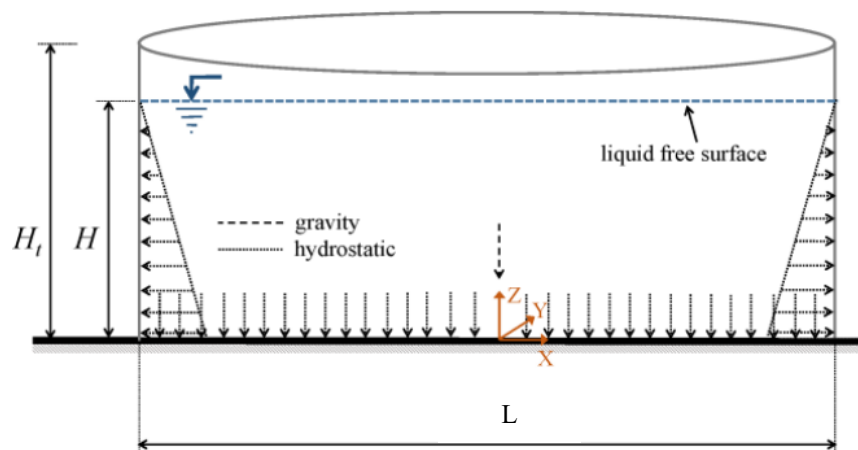
P_m = Panjang pelat miring (cm)

l = Panjang pelat (cm)

n_t = Jumlah anak tangga yang digunakan

2.4.3.6 Dinding Bak

Untuk penulangan pada dinding bak untuk kolam renang, mirip dengan perencanaan penulangan pelat lantai. Namun yang menjadi perbedaan yaitu pembebanan yang bekerja pada elemen struktur. Pada dinding bak, beban yang bekerja yaitu beban hidrostatik yang berasal dari tekanan air pada dinding bak, beban dari pergerakan air saat terjadi gempa atau gelombang di dalam kolam (beban hidrodinamik), beban mati yang berasal dari berat dinding kolam itu sendiri serta *finishing*. Beban hidrostatik ini membentuk suatu tekanan yang terdistribusi berbentuk segitiga. Sedangkan untuk pada bagian pelat lantai, beban hidrostatik terdistribusi secara merata.



Gambar 2.26 Distribusi Beban Hidrostatik
(Sumber: Bakalis & Karamanos, 2021)

2.5 Kriteria Desain Struktur

2.5.1 Syarat-Syarat Desain Struktur

Syarat-syarat desain struktur ini dimuat dalam SNI 1727:2020 pada Pasal 1.3, diantaranya sebagai berikut:

1. Kekuatan dan kekakuan

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 1.3.1, bangunan dan struktur lain dan semua bagiannya harus dirancang dan dibangun dengan kekuatan dan kekakuan yang cukup agar dapat memberikan stabilitas struktural, melindungi komponen struktural dan sistem serta dapat memenuhi persyaratan kemampuan layan.

Komponen struktur harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan kombinasi pembebanan yang diterapkan pada suatu bangunan namun tanpa melebihi kondisi batas kekuatan dan tegangan izin yang berlaku untuk material konstruksi yang digunakan.

Hukum Hooke mendefinisikan kekakuan pada teori elastisitas linear yaitu sebagai berikut:

$$F = k \Delta \quad (2.121)$$

Dengan F merupakan gaya yang bekerja, k sebagai kekakuan dan Δ sebagai deformasi atau simpangan. Dalam ASCE 41 - 17, 2017 dijelaskan bahwa kekakuan efektif pada elemen struktur dapat dihitung dari hubungan berikut:

$$k_{\text{eff}} = \frac{f_y}{\Delta_y} \quad (2.122)$$

2. Kemampuan layan

Disebutkan dalam Pasal 1.3.2 SNI 1727:2020, untuk memenuhi kemampuan layan, sistem struktur dan komponennya harus didesain agar memiliki kekakuan yang cukup untuk membatasi defleksi, *drift* lateral, getaran, atau deformasi lain akibat beban layan yang mempengaruhi penggunaan dan kinerja bangunan dan struktur lainnya berdasarkan persyaratan yang ditetapkan.

3. Gaya dan efek regangan sendiri

Berdasarkan Pasal 1.3.4 disebutkan bahwa struktur harus dibuat dengan ketentuan untuk mengantisipasi gaya regangan sendiri dan efeknya yang timbul akibat perbedaan penurunan fondasi yang terjadi dan perubahan dimensi akibat temperatur, kadar air, susut, rangkai, dan efek sejenis lainnya.

4. Analisis

Setiap komponen struktur harus memiliki efek beban yang ditentukan dengan metode analisis struktur yang memperhitungkan keseimbangan, stabilitas, kompatibilitas geometrik, sifat bahan jangka pendek ataupun jangka panjang.

5. Aksi struktur yang berlawanan

Seluruh elemen struktur dan sistemnya harus dirancang untuk dapat menahan gaya akibat gempa bumi dan angin dengan mempertimbangkan efek guling, gelincir, dan gaya angkat, serta alur beban menerus harus disediakan untuk menyalurkan beban-beban ke fondasi. Ketika kuat geser digunakan untuk mengisolasi elemen-elemen, efek gesekan antaran elemen harus diperhitungkan sebagai suatu gaya. Apabila seluruh atau sebagian dari gaya penahan ini diperoleh akibat beban mati, maka beban mati tersebut harus diambil sebagai beban mati minimum. Selain itu, lendutan vertikal dan horizontal akibat gaya tersebut juga harus diperhitungkan.

2.5.2 Jumlah Ragam

Dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 disebutkan bahwa analisis diizinkan untuk memasukkan jumlah ragam yang minimum untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi paling sedikit 90% dari massa aktual yang dimodelkan.

Dengan catatan, jika nilai partisipasi massa yang sudah ditentukan dalam model belum memenuhi syarat, maka dapat menambahkan jumlah ragam hingga mencapai partisipasi massa.

2.5.3 Ketidakberaturan Struktur

Dalam perancangan struktur ini tidak diperbolehkan adanya ketidakberaturan struktur yang berlebihan. Ketidakberaturan struktur ini diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.3.2.1 untuk ketidakberaturan horizontal yang diuraikan pada Tabel 2.23 dan dalam Pasal 7.3.2.2 untuk ketidakberaturan vertikal pada Tabel 2.24.

Tabel 2.23 Ketidakberaturan Horizontal Struktur

Tipe	Penjelasan
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 suatu 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 diafragmanya 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 diafragmanya 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

Tipe	Penjelasan
	Didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.
4	Ketidakteraturan Akibat Pergeseran Tegak Lurus terhadap Bidang Didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.
5	Ketidakteraturan Sistem Non paralel Didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Tabel 2.24 Ketidakteraturan Vertikal Struktur

Tipe	Penjelasan
1a	Ketidakteraturan 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	Ketidakteraturan 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	Ketidakteraturan 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 perlu ditinjau.
3	Ketidakteraturan Geometri Vertikal

Tipe	Penjelasan
	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 elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.
5a	Ketidakberaturan 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	Ketidakberaturan 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.

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

2.5.4 Skala Gempa

Untuk penskalaan gaya telah diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4.1 dimana disebutkan bahwa apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_I) kurang dari 100% dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_I . Maka dapat dirumuskan bahwa $V > V_I$. Jika hal tersebut tidak memenuhi maka perlu diberikan skala gaya pada model struktur gedung melalui persamaan sebagai berikut:

$$\eta_x = \frac{V}{V_{tx}} \quad (2.123)$$

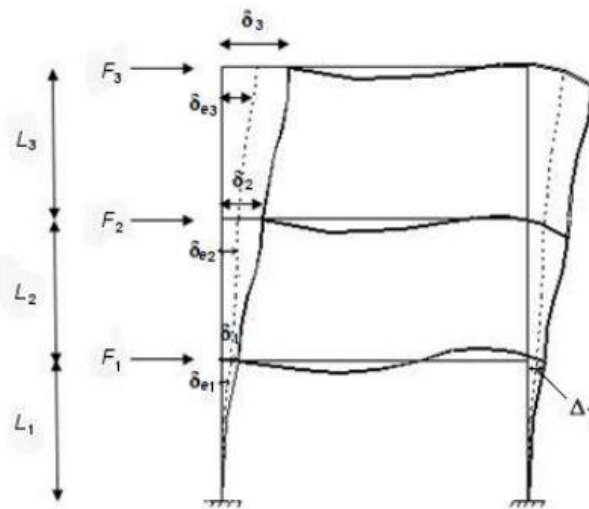
$$\eta_y = \frac{V}{V_{ty}} \quad (2.124)$$

$$\text{Faktor Skala}_x = g \frac{I_e}{R} \cdot \eta_x \quad (2.125)$$

$$\text{Faktor Skala}_y = g \frac{I_e}{R} \cdot \eta_y \quad (2.126)$$

2.5.5 Simpangan Antar Tingkat

Menurut SNI 1726:2019 dalam Pasal 7.8.6 disebutkan bahwa penentuan simpangan antar tingkat dihitung berdasarkan perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Penentuan Simpangan Antar Tingkat

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Keterangan:

F_x = Gaya gempa desain tingkat kekuatan

δ_{ex} = Perpindahan elastik yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan

Δ_x = Simpangan antar tingkat

Dari gambar di atas dapat diperoleh persamaan perpindahan yang diperbesar pada tingkat ke- x (δ_x) sebagai berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{ex}}{I_e} \quad (2.127)$$

Keterangan:

C_d = Faktor pembesaran simpangan lateral pada Tabel 12 SNI 1726:2019

I_e = Faktor keutamaan gempa

Menurut Imanuel dkk., (2019) nilai *displacement* tersebut dibatasi oleh $h/240$. Dimana h merupakan tinggi keseluruhan bangunan. Sedangkan untuk simpangan antar tingkat dibatasi oleh Pasal 7.12.1 SNI 1726:2019 yang menyebutkan bahwa simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a) seperti diuraikan pada Tabel 2.25 berikut dengan h_{sx} merupakan tinggi tingkat di bawah tingkat ke- x .

Tabel 2.25 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 ^d	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2019)

2.5.6 P-delta

Efek P-delta terjadi saat beban gravitasi (P) memiliki pengaruh terhadap perpindahan horizontal (Δ). Simpangan yang diakibatkan oleh beban lateral akibat

gempa yang bekerja pada suatu elemen struktur menimbulkan eksentrisitas beban gravitasi (P) terhadap sumbu vertikal kolom, dari eksentrisitas tersebut menghasilkan momen internal tambahan yang dapat mempengaruhi momen hasil analisis orde pertama. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.7 terkait pengaruh P -delta yang diperhitungkan berdasarkan koefisien stabilitas (θ). Untuk menentukan nilai θ dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \quad (2.128)$$

Keterangan:

P_x = Beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat ke- x (kN)

V_x = Gaya geser seismik yang bekerja antar tingkat x dan $x-1$ (kN)

h_{sx} = Tinggi tingkat di bawah lantai yang ditinjau (m)

Namun nilai θ ini dapat diabaikan apabila kurang dari 0,1. Namun apabila nilainya lebih dari 0,1 maka nilai θ tidak boleh melebihi θ_{max} yang ditentukan pada persamaan berikut:

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \quad (2.129)$$

Dengan nilai β merupakan rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser untuk tingkat antara tingkat x dan $x-1$. Namun diizinkan diambil sebesar 1,0. Jika nilai θ lebih besar dari θ_{max} maka struktur berpotensi tidak stabil dan harus didesain ulang.