

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Kolam Renang

2.1.1 Pengertian Kolam Renang

Menurut Permenkes Nomor 32 Tahun 2017 kolam renang merupakan suatu tempat maupun fasilitas umum yang berupa konstruksi kolam dan berisikan air olahan dengan dilengkapi fasilitas tambahan untuk kenyamanan dan pengamanan yang baik yang terletak diluar ataupun didalam suatu bangunan yang digunakan untuk berenang, rekreasi, atau olahraga air lainnya.

2.1.2 Jenis Kolam Renang

Kolam renang dapat dibedakan berdasarkan lokasinya menjadi 2 jenis.

1. Indoor-Pool

Dimana kolam renang terletak pada halaman dalam suatu bangunan. Kolam renang jenis ini biasanya diperuntukan untuk penggunaan perorangan atau sekelompok orang.

2. Outdoor-Pool

Dimana kolam renang terletak di luar halaman suatu bangunan. Kolam renang jenis ini biasanya diperuntukan untuk penggunaan oleh khalayak umum. Kolam renang luar ruangan biasanya dibangun dipermukaan tanah dan pada bagian atas bangunan.

Kolam renang juga dapat dibedakan berdasarkan pemakaiannya menjadi 3 jenis yaitu kolam renang perorangan, kolam renang semi umum, dan kolam renang umum.

2.1.3 Bangunan Dengan Kolam Renang Pada Lantai Teratas

Kolam renang merupakan salah satu fasilitas yang menjadi strategi untuk menarik perhatian pengunjung. Untuk menarik perhatian pengunjung biasanya kolam renang diletakan pada lantai atap. Beberapa hotel dengan penempatan kolam renang pada lantai teratasnya antara lain adalah Student Park Hotel Apartement, Indolux Hotel, Hotel Ibis Style, dan Swiss Belhotel.



Gambar 2. 1 Student Park Hotel Apartement Yogyakarta



Gambar 2. 2 Indolux Hotel



Gambar 2. 3 Hotel Ibis Style



Gambar 2. 4 Swiss Belhotel

2.1.4 Material Umum Kolam Renang

Terdapat beberapa pilihan material untuk bangunan kolam renang seperti *fiberglass, galvanis, aluminium, batu, kaca, keramik*, serta kombinasi lainnya yang didapat dari bahan yang telah disebutkan. Untuk pemilihan material, beton sering dipilih karena kesederhanaannya dalam proses konstruksi terlebih jika posisi kolam renang berada pada posisi yang sulit. Beton juga dapat menjadi bantalan struktur yang dapat menahan beban air dengan baik.

2.1.5 Fasilitas Kolam Renang

Fasilitas yang disediakan pada kolam renang merujuk pada ISPS 2021.

2.1.5.1 Rest Ledges

Rest ledges merupakan bagian kolam renang yang digunakan sebagai area istirahat sementara. Area ini terbentang pada sekeliling tepi kolam renang. Berdasarkan ISPS 2021 pasal 404.1 area *rest ledges* harus berada pada kedalaman maksimum 1,22 m dari permukaan air dan memiliki lebar injakan minimum 102 mm.

2.1.5.2 Pool Deck

Pool deck merupakan area tepi kolam yang digunakan sebagai akses pengujung ke kolam renang. Berdasarkan ISPS 2021 pasal 406.2 area *pool deck* yang disediakan harus lebih besar dari 90% keliling kolam renang. Lebar area *pool deck* minimum adalah 1,22 mm.

2.1.5.3 Sistem Sirkulasi

Sistem sirkulasi air kolam renang merupakan hal yang sangat penting diperhatikan untuk menjaga kualitas air kolam agar tetap bersih. Sistem sirkulasi kolam renang terdiri atas pompa, pipa, *inlets*, *outlets* dan filter. Pompa dan filter yang digunakan harus disesuaikan dengan kebutuhan sirkulasi air kolam renang. Berdasarkan ISPSK 2021 pasal 311.2.1 air kolam renang harus disirkulasi minimal satu kali dalam satu hari dan peralatan yang digunakan harus seukuran dengan volume *turn over* air kolam. Peralatan sirkulasi air kolam renang berdasarkan ISPSK 2021 pasal 311.2.2 harus ditempatkan pada area yang mudah diakses. Kebutuhan kapasitas pompa perjam yang dibutuhkan dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.1. Pompa yang digunakan merupakan pompa yang memiliki nilai debit air yang lebih besar dibanding debit air yang dibutuhkan.

$$Q = \frac{V}{T_o} \quad (2.1)$$

Keterangan:

V = volume air kolam renang total (m^3)

T_o = waktu *turn over* (jam)

Pemilihan filter air kolam renang didasarkan oleh kebutuhan diameter filter.

$$D_f = \sqrt{\frac{Q}{Q_s}} \quad (2.2)$$

Keterangan:

D_f = diameter filter yang dibutuhkan (m)

Q = debit air yang dibutuhkan (m^3 /jam)

Q_s = debit air filter standar ($40 m^3/ m^2$ /jam)

2.1.5.4 Perlengkapan Keamanan dan Keselamatan

Perlengkapan keamanan yang harus disediakan pada atas *pool deck* sekeliling kolam renang adalah *handholds*. Pada tepi kolam diperlukan penanda kedalaman air sebagai informasi bagi pengunjung, penanda kedalaman air pada tepi kolam renang menggunakan warna yang mencolok agar mudah terlihat. Selain itu diperlukan juga peraturan tertulis yang diletakan pada area yang mudah terlihat untuk meningkatkan ketaatan para pengunjung sekaligus menurunkan resiko kecelakaan yang terjadi disekitar area kolam renang Perlengkapan untuk kegiatan evakuasi pengunjung yang mengalami kecelakaan yang perlu disediakan antara lain adalah tambang, ban, dan kotak P3K.

2.2 Struktur Bangunan

Berdasarkan SNI 2847-2019 struktur bangunan terdiri atas dua bagian yaitu struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas merupakan bagian dari suatu struktur bangunan yang berada diatas permukaan tanah. Sedangkan struktur bawah merupakan bagian suatu struktur bangunan yang terletak dibawah permukaan tanah. Bagian struktur atas terdiri dari kolom, balok, pelat lantai, dan struktur tambahan lainnya. Sedangkan yang termasuk bagian struktur bawah adalah *basement* dan struktur pondasi. Suatu struktur bangunan dapat dikatakan aman jika memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal untuk dapat mendukung kekuatan, kekakuan serta kapasitas disipasi energi yang cukup.

2.3 Struktur Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton struktural yang ditulangi dengan tidak kurang dari jumlah baja prategang atau tulangan nonprategang minimum yang ditetapkan. Beton bertulang merupakan suatu material gabungan yang dibuat untuk mencapai

kekuatan yang diinginkan. Perpaduan antara material beton dan juga baja dimaksud untuk saling melengkapi kelemahan masing-masing material. Beton merupakan material yang mampu menahan tekan tetapi tidak kuat menahan tarik. Sehingga beton dapat mengalami keretakan jika dibebani dengan tarik. Sedangkan baja merupakan material yang mampu menahan tarik tetapi lemah terhadap tekan. Sehingga untuk menahan gaya tarik yang diberikan cukup besar pada struktur digabungkanlah kedua material tersebut dan dikenal dengan istilah beton bertulang (Asroni, 2017).

Pada umumnya beton polos akan mengalami keruntuhan pada saat pemberian beban dengan tingkat rendah. Hal ini terjadi karena beton terlebih dahulu mengalami kegagalan tarik sebelum mencapai kuat tekannya, maka dari itu perlu adanya material tambahan yaitu baja yang harus diletakan sedekat mungkin dengan serat tarik (Setiawan, 2016).

2.3.1 Material Beton

Menurut SNI-2847-2019 beton merupakan campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Kekuatan beton terdiri dari kuat tekan beton, kuat tarik beton, dan modulus elastisitas beton.

Kuat tekan beton diberi notasi f'_c , dimana kekuatan ini merupakan kekuatan beton yang sudah berumur 28 hari sesuai dengan ketentuan. Karena kuat tekan beton lebih dominan maka kuat tarik beton (f_{ct}) memiliki nilai yang jauh lebih kecil dari kuat tekannya. Sedangkan modulus elastisitas beton sendiri adalah sudut yang terbentuk antara hubungan tegangan-regangan tekan beton (Asroni, 2017).

2.3.2 Material Tulangan Baja

Pada umumnya beton bertulang menggunakan dua macam jenis penulangan yaitu tulangan polos dan tulangan ulir. Menurut SNI 2847 tulangan yang digunakan untuk tulangan struktur beton pada gedung harus merupakan tulangan ulir. Tulangan ulir bertujuan untuk meningkatkan kuat lekat antar bahan beton bertulang, sehingga dapat mencegah terjadinya slip antar tulangan baja dan beton (Setiawan, 2016).

Tabel 2. 1 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 ($d \geq 12$ mm)	5d ($d \geq 19$ mm)
BjTS 280	Min 280 Maks 405	Min 350	11 ($d \leq 10$ mm)	3,5d ($d \leq 16$ mm)
			12 ($d \geq 13$ mm)	5d ($d \geq 19$ mm)
BjTS 420A	Min 420 Maks 545	Min 525	9 ($d \leq 19$ mm)	3,5d ($d \leq 16$ mm)
			8 ($22 \leq d \leq 25$ mm)	5d ($19 \leq d \leq 25$ mm)
			7 ($d \geq 29$ mm)	7d ($29 \leq d \leq 36$ mm) 9d ($d > 36$ mm)
BjTS 420B	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	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 700	Min 700 Maks 825	Min 805	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)

2.3.3 Selimut Beton

Pada pelaksanaannya baja diselimuti oleh selimut beton untuk melindungi tulangan baja. Selimut ini dimaksud untuk melindungi tulangan baja dari pengaruh eksternal seperti korosi dan kebakaran. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 20.6.1.3 tebal selimut beton diatur seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Ketebalan Selimut Beton

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

2.4 Preliminary Design

Penentuan dimensi dan mutu material awal elemen struktur dilakukan dengan mengikuti beberapa pertauran yang ditetapkan.

2.4.1 Preliminary Mutu Material

Material konstruksi yang digunakan akan sangat mempengaruhi perilaku dari suatu struktur. Karakteristik material beton maupun tulangan baja yang dipilih harus sesuai dengan standar yang ditetapkan di Indonesia. Pada dasarnya beton bertulang dibagi menjadi dua berdasarkan bahan material penyusunnya, yaitu beton dan tulangan baja. Pada beton hal yang dijadikan acuan dalam penentuan pemilihannya didasarkan pada kuat tekan beton (f_c'). Pada peraturan SNI 2847-2019 pasal

19.2.1 diatur bahwa nilai minimum mutu beton untuk kegunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) adalah sebesar 21 MPa. Sedangkan jika struktur umum, nilai minimum mutu beton yang digunakan adalah sebesar 17 MPa. Untuk batas maksimum dari mutu beton tidak ditentukan. Standar mutu beton ini menjadikan suatu bangunan dapat memiliki ketahanan dan kinerja yang baik terhadap lingkungan dan tidak mudah berubah seiring bertambahnya umur bangunan.

Sedangkan pada baja tulangan parameter yang paling berpengaruh adalah kondisi permukaan dari baja tulangan itu sendiri. Baja tulangan dapat dibagi menjadi dua berdasarkan kondisi permukaannya yaitu baja tulangan polos dan baja tulangan ulir atau sirip. Pengaruh kondisi permukaan didasari oleh interaksi penampang tulangan dengan beton. Pada batang polos, kuat lekat yang diberikan terhadap beton hanya terdiri dari mekanisme adhesi dan juga friksi, dan besarnya hanya berkisar 10% dari kuat lekat baja tulangan ulir. Hal ini yang menyebabkan baja tulangan polos memiliki nilai negatif untuk digunakan pada suatu struktur bangunan. Namun pada penggunaannya, baja tulangan polos masih dapat digunakan untuk jenis tulangan spiral. Namun, untuk jenis penulangan lainnya harus menggunakan baja tulangan sirip atau ulir.

Parameter lainnya dari baja tulangan yang juga berpengaruh terhadap perilaku struktur adalah nilai kuat leleh, nilai faktor kuat lebih, dan nilai rasio kuat ultimit. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 20.2.2 mengatur bahwa, mutu maksimum tulangan ulir untuk sistem bangunan SRPMK baik bagi elemen lentur (balok) maupun elemen gaya aksial (kolom) adalah sebesar 420 Mpa. Sedangkan untuk struktur lainnya adalah sebesar 550 MPa. Pembatasan ini dimaksudkan untuk

menghindari kegagalan *brittle* pada elemen, dimana saat baja tulangan mengembangkan kemampuan lenturnya dan menyebabkan timbulnya geser dan tegangan lekatan yang tinggi antar beton dan baja tulangan. Hal ini dapat terjadi ketika elemen struktur menerima beban gempa yang bersifat siklik (bolak-balik).

2.4.2 Preliminary Dimensi Elemen Struktur

2.4.2.1 Preliminary Dimensi Balok

Dimensi balok terdiri atas tinggi dan balok. Penentuan nilai awal ini diatur dalam SNI 2847-2019.

2.4.2.1.1 Batas Minimum Tinggi Balok

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.3.1 untuk beton normal dan tulangan mutu 420 MPa, batasan tinggi minimum balok nonprategang dapat dihitung dengan rumusan yang tertera pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Batas Minimum Tinggi Balok

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

2.4.2.1.2 Nilai Lebar Balok

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.2 mengenai syarat lebar balok untuk struktur SRPMK, batasan dimensi balok harus memenuhi:

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

2.4.2.1.3 Menentukan Tinggi Balok awal

Selanjutnya penentuan tinggi balok adalah dengan menggunakan rumus pendekatan yang disarankan oleh Chu-Kia Wang dan Salmon. Dimana rasio tinggi dan lebar dari balok adalah sebesar 1,5 sampai dengan 2.

2.4.2.2 Preliminary Pelat Lantai

2.4.2.2.1 Jenis Pelat Lantai

Pelat lantai dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu pelat satu arah dan pelat dua arah. Perbedaan keduanya didasari oleh arah penyaluran beban. Pelat satu arah adalah pelat beton yang didukung hanya pada dua sisi tumpuan yang berlawanan, sehingga akan terjadinya defleksi atau lendutan pada pelat dalam arah tegak lurus dari sisi tumpuan. Karena pelat satu arah hanya ditumpu pada dua sisi yang berlawanan, maka beban yang bekerja pada pelat akan didistribusikan oleh pelat dalam satu arah yang menuju ke arah dua sisi tumpuan.

Jika pelat bertumpu pada empat sisi tumpuan, tetapi dengan rasio panjang terhadap lebar nilainya sama dengan 2 atau lebih besar ($L/W \geq 2$), maka reaksi beban akan lebih banyak didistribusi ke arah bentang yang lebih pendek, maka pelat tersebut bisa diklasifikasikan sebagai pelat satu arah.

Berbeda dengan pelat satu arah yang hanya bertumpu pada dua sisinya, pada pelat dua arah ditopang pada semua sisi tumpuan, dengan rasio panjang terhadap lebarnya nilainya kurang dari 2 ($L/W < 2$). Hal ini dikarenakan distribusi beban yang terjadi menuju ke dua arah (arah x dan y). Oleh karena itu, penulangan dibutuhkan ke kedua arah sisi pelat tersebut.

2.4.2.2.2 Ketebalan Pelat Lantai

Ketebalan pelat lantai dipengaruhi beberapa parameter yang diantaranya, panjang bentang bersih pelat lantai (L_n), rasio panjang bentang bersih terpanjang dengan bentang bersih terpendek (β), kuat leleh tulangan baja, dan nilai rata-rata (α_{fm}) dari keempat balok perangkai. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 8.3.12 nilai ketebalan pelat lantai seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Tebal Minimum Pelat Lantai

<i>Stiffness</i>	α_{fm}	h_{min}	
<i>Shallow Beam</i>	$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Mengikuti ketentuan SNI 2847-2019 Pasal 8.3.1.1; Hal-133, yaitu pelat tanpa balok perangkai.	
<i>Medium Stiff Beam</i>	$0,2 \leq \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{L_n (0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)}$
			125 mm
<i>Very Stiff Beam</i>	$\alpha_{fm} \geq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{L_n (0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 9\beta}$
			90 mm

2.4.2.3 Preliminary Kolom

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.2.1 batasan dimensi kolom harus memenuhi dua persyaratan. Persyaratan pertama yaitu dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri, tidak kurang dari 300 mm. Persyaratan kedua yaitu, rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurusnya tidak kurang dari 0,4. Selain menggunakan ketentuan SNI 2847-2019, juga dapat digunakan rumus pendekatan untuk dimensi kolom:

$$A_g \geq P_u / 0,35 f_c \quad (2.3)$$

Dimana A_g merupakan luas kolom dan P_u merupakan nilai estimasi beban.

2.5 Pembebanan

Beban merupakan gaya-gaya yang timbul dan bekerja pada struktur. Gaya-gaya tersebut bisa berasal dari alam ataupun kegiatan manusia. Pembebanan sendiri merupakan proses membebani atau membebankan. Dalam merencanakan struktur perlu adanya identifikasi beban-beban apa saja yang bekerja pada struktur. Pembebanan dilakukan untuk memastikan jika dalam perencanaan gedung, gedung yang direncanakan dapat dinyatakan layak dibangun dari segi keamanan dan kekuatannya. Maka dari itu perencanaan beban ini harus dilakukan secara teliti dan matang untuk meminimalisir kegagalan struktur nantinya. Secara umum, struktur bangunan dikatakan aman dan stabil apabila mampu menahan beban gravitasi dan beban gempa yang bekerja pada bangunan tersebut.

Pada perencanaan beban pada penelitian ini digunakan aturan SNI 1727-2020 dan SNI 1726-2019. Pada SNI 1727-2020 digunakan untuk pembebanan pada struktur sedangkan untuk SNI 1726-2019 digunakan untuk pembebanan gempa pada struktur.

2.5.1 Beban Statis

Beban statis adalah beban yang bersifat tetap, baik besarnya atau intensitasnya, titik tempat bekerjanya, dan arah garis kerjanya.

2.5.1.1 Beban Mati

Beban mati berdasarkan SNI 1727-2020 merupakan berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang. Dalam menentukan besar dari beban mati harus menggunakan besar beban yang digunakan pada konstruksi yang sebenarnya. Namun, jika tidak ada informasi yang jelas maka nilai yang digunakan

adalah nilai yang disetujui oleh pihak yang berwenang. Berdasarkan PPURG-1987 nilai beban mati ditentukan seperti Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Beban Mati

Material	Berat (kg/m³)
Baja	7850
Batu alam	2600
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
Batu karang (berat tumpuk)	700
Batu pecah	1450
Besi tuang	7250
Beton	2200
Beton bertulang	2400
Kayu (Kelas I)	1000
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
Pasangan bata merah	1700
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
Pasangan batu cetak	2200
Pasangan batu karang	1450
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
Pasir (jenuh air)	1800
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
Tanah lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700
Tanah lempung dan lanau (basah)	2000
Timah hitam	11400
Adukan, per cm tebal	
Dari semen	21
Dari kapur, semen merah atau tras	17
Aspal termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
Satu bata	450
Setengah bata	250
Dinding pasangan batako berlubang	
Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200
Tebal dinding 10 (HB 10)	120
Tanpa Lubang	
Tebal dinding 15 cm	300
Tebal dinding 10 cm	200
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
Semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 200 kg/m ²	40
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s minimum 0,80 m	7
Penutup atap genting dengan ren dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² bidang atap	40

2.5.1.2 Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan. Besar beban hidup diatur dalam SNI 1727-2020 sesuai dengan Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Beban Hidup

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)
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)	
• Tribun penonton stadion dan arena dengan kursi tetap	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
• Ruang pertemuan lainnya	60 (2,87)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
Balkon dan Dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi 100 psf (4,79 kN/m ²)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Jalur untuk Akses Pemeliharaan	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	300 (1,33)
Koridor				
• Lantai pertama	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
• Lantai lain	Sama Seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain			

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 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 x 1 in (25 mm x 25 mm))				200 (0,89)
Jalur Penyelamatan Saat Kebakaran Hunian satu keluarga saja	100 (4,79) 40 (1,92)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	
Tangga Permanen				Lihat pasal 4.5.4
Garasi/ Parkiran (Lihat Pasal 4.10) <ul style="list-style-type: none"> Mobil penumpang saja Truk dan bus 	40 (1,92) Lihat pasal 4.10.2	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2) Ya (4.7.2)	
Pegangan Tangga dan Pagar Permanen Batang pegangan				Lihat pasal 4.5.1 Lihat pasal 4.5.2
Helipad (Lihat pasal 4.11) <ul style="list-style-type: none"> Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang Helikopter dengan berat lepas landas lebih dari 3.000 lb (13,35 kN) 	40 (1,92) 60 (2,87)	Tidak (4.11.1) Tidak (4.11.1)		Lihat Pasal 4.11.2 Lihat Pasal 4.11.2
Rumah Sakit <ul style="list-style-type: none"> Ruang operasi, laboratorium Ruang pasien Koridor diatas lantai pertama 	60 (2,87) 40 (1,92) 80 (3,83)	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)

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)
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 diatas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.3)	Ya (4.7.2)	1000 (4,45)
Pabrik				
• Ringan	125 (6,0)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	2000 (8,9)
• Berat	250 (11,9)	Tidak (4.7.3)	Ya (4.7.3)	3000 (13,4)
Gedung Perkantoran				
• Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				
• Lobi dan koridor lantai pertama	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2000 (8,9)
• Kantor	50 (2,40)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2000 (8,9)
• Koridor diatas lantai pertama	80 (3,83)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	2000 (8,9)
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)	

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)
<ul style="list-style-type: none"> Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur Semua ruang kecuali tangga 	30 (1,44)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Semua hunian rumah tinggal lainnya	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Ruang pribadi dan koridornya	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Ruang publik	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)	
koridor ruang publik	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)	
Atap				
<ul style="list-style-type: none"> Atap datar, berbubung, dan lengkung 	20 (0,96)	Ya (4.8.2)		
<ul style="list-style-type: none"> Atap yang digunakan penghuni 	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)		
<ul style="list-style-type: none"> Atap untuk tempat berkumpul 	100 (4,70)	Ya (4.8.3)		
Atap vegetatif dan atap lansekap				
<ul style="list-style-type: none"> Atap bukan untuk hunian 	20 (0,96)	Ya (4.8.2)		
<ul style="list-style-type: none"> Atap untuk tempat berkumpul 	100 (4,79)	Ya (4.8.3)		
<ul style="list-style-type: none"> Atap untuk penggunaan lainnya 	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)		
Awning dan Kanopi				
<ul style="list-style-type: none"> Atap konstruksi fabric yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan 	5 (0,24)	Tidak (4.8.2)		
Rangka Penumpu layar penutup	5 (0,24)	Tidak (4.8.2)		200 (0,89)
	Berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka			

2.5.1.3 Beban Air Hujan

Berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 8.3 lantai atap direncanakan mampu menahan beban dari air hujan yang terkumpul jika sistem drainase utama tertutup dan ditambah dengan beban merata akibat kenaikan air diatas sistem drainase skunder.

$$R = 0,0098 \times (d_s + d_h) \quad (2.4)$$

Keterangan:

R = beban air hujan (kN/m²)

d_s = tinggi hidraulik (mm)

d_h = tinggi kepala hidraulik (mm)

2.5.1.4 Beban Angin

Beban angin diperhitungkan menurut SNI 1727-2020 dengan memperhitungkan beberapa parameter beban angin yang nantinya menentukan besaran beban angin.

2.5.1.4.1 Kategori Resiko Bangunan (KRG)

Kategori resiko bangunan merujuk pada SNI 1726-2019 pasal 4.1 yang didasarkan oleh fungsi dari suatu bangunan. Kategori resiko bangunan dapat dilihat pada Tabel 2.11.

2.5.1.4.2 Kecepatan Angin Dasar (v)

Kecepatan angin dasar harus diambil berdasarkan lokasi bangunan tersebut. Berdasarkan SNI 1727-2020 nilai kecepatan angin dasar dapat merujuk pada buku peta angin Indonesia.

2.5.1.4.3 Faktor Arah Angin (K_d)

Nilai faktor arah angin diambil berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.5.3

dan diambil berdasarkan tipe struktur. Nilai K_d dapat dilihat pada tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Faktor Arah Angin

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan Gedung	
SPGAU	0,85
K&K	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah	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	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidnag tunggal	0,85
Rangka batang Menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

2.5.1.4.4 Kategori Kekasaran Permukaan

Berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.7.2 kategori kekasaran permukaan ditentukan berdasarkan:

1. Kekasaran Permukaan B

Daerah perkotaan, pinggir kota, daerah berhutan, daerah lain yang memiliki penghalang berdekatan.

2. Kekasaran Permukaan C

Dataran terbuka, dengan penghalang terbesar memiliki tinggi < 9,1 m. Dataran terbuka tanpa penghalang seperti padang rumput.

3. Kekasaran Permukaan D

Permukaan datara, area tanpa halangan dan permukaan air, mencakup hamparan lumpur halus.

2.5.1.4.5 Faktor Topografi (K_{zt})

Faktor topografi sangat mempengaruhi besarnya beban angin hal ini dikarenakan bentuk topografi pada daerah bangunan yang dibangun memengaruhi kecepatan angin. Kondisi topografi khusus dikhawatirkan akan membuat beban angin semakin besar sesuai SNI 1727-2020 pasal 26.8.1. Nilai faktor topografi (K_{zt}) dapat dihitung dengan rumus:

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (2.5)$$

Nilai K_1 , K_2 dan K_3 disesuaikan dengan kondisi topografi daerah sekitar bangunan.

Untuk daerah yang tidak berdekatan dengan bukit, tebing atau kondisi topografi khusus lainnya maka nilai K_{zt} dapat diambil 1.

2.5.1.4.6 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Faktor elevasi permukaan tanah bermaksud untuk menyesuaikan densitas udara. Dalam semua kasus nilai K_e boleh diambil 1.

2.5.1.4.7 Efek Hembusan Angin (G)

Faktor efek hembusan angin untuk bangunan yang kaku boleh diambil 0,85. Namun juga dapat diperhitungkan lebih lanjut dengan beberapa parameter yang berpengaruh.

2.5.1.4.7.1 Intensitas Turbulensi Pada Ketinggian z (I_z)

Berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.11.4 nilai I_z harus dihitung pada ketinggian z , dimana z merupakan tinggi ekuivalen dari bangunan gedung atau struktur yang ditentukan sebesar 0,6h.

$$I_z = c \times \left(\frac{10^{1/6}}{z} \right) \quad (2.6)$$

Keterangan:

I_z = intensitas turbulensi pada ketinggian z

c = konstanta exposure dataran sesuai tabel 2.8

z = tinggi ekuivalen dari bangunan sebesar 0,6h (m)

Konstanta exposure dataran yang digunakan sesuai pada SNI 1727-2020 pasal 26.11.4.

Tabel 2. 8 Konstanta Exposure Dataran

Exposure	α	Z_g (m)	\hat{a}	b	\bar{a}	b	c	l (m)	ϵ	Z_{min} (m)
B	7,0	365,76	1/7	0,84	1/4,0	0,45	0,30	97,54	1/3	9,14
C	9,5	274,32	1/9,5	1,00	1/6,5	0,65	0,20	152,4	1/5	4,57
D	11,5	213,36	1/11,5	1,07	1/9,0	0,80	0,15	198,12	1/8	2,13

2.5.1.4.7.2 Respon Latar Belakang (Q)

Berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.11.4 nilai respon latar belakang (Q) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7.

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1+0,63 \left(\frac{B+h}{L_z}\right)^{0,63}}} \quad (2.7)$$

Keterangan:

Q = respon latar belakang

B = lebar bangunan (m)

h = ketinggian bangunan (m)

L_z = skala panjang integral dari turbulensi pada tinggi ekuivalen

2.5.1.4.7.3 Efek Hembusan Angin Syarat (G)

Untuk struktur kaku, nilai faktor hembusan angin (G) harus diambil sebesar 0,85 atau dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8. Nilai hasil perhitungan harus dipastikan memiliki nilai yang lebih besar untuk dapat digunakan.

$$G = 0,925 \left(\frac{1+0,7 g_q I_z Q}{1+0,7 g_v I_z} \right) \quad (2.8)$$

Keterangan:

G = faktor hembusan angin

Q = respon latar belakang

g_q = berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.11.4 harus diambil sebesar 3,4

g_v = berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.11.4 harus diambil sebesar 3,4

I_z = Intensitas turbulensi pada ketinggian z

2.5.1.4.8 Koefisien Eksposure Tekanan Velositas (k_z)

Koefisien eksposure tekanan velositas dipengaruhi oleh ketinggian diatas permukaan tanah. Pada SNI 1727-2020 pasal 26.10 nilai k_z pada $4,6 \text{ m} < z < z_g$ dapat dihitung sesuai dengan persamaan 2.9. Sedangkan nilai k_z pada $z < 4,6 \text{ m}$ dapat dihitung dengan persamaan 2.10.

$$k_z = 2,01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.9)$$

$$k_z = 2,01 \left(\frac{15}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (2.10)$$

Keterangan:

k_z = Koefisien eksposure tekanan velositas

z_g = konstanta eksposure dataran sesuai tabel 2.8

2.5.1.4.9 Tekanan Velositas (q_z)

Tekanan velositas ditentukan berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.10.2 yang dapat dihitung sesuai persamaan 2.11.

$$q_z = 0,613 k_z k_{zt} k_d k_e v^2 \quad (2.11)$$

Keterangan:

q_z = tekanan velositas pada ketinggian z (N/m^2)

k_z = Koefisien eksposure tekanan velositas

k_{zt} = faktor topografi

k_d = faktor arah angin

k_e = faktor elevasi permukaan tanah

v = Kesepatan angin dasar

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

Koefisien tekanan eksternal (C_p) diambil berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 27.3 dan dapat dilihat pada tabel 2.9. Sedangkan koefisien tekanan internal (GC_{pi}) diambil berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 26.13 dan dapat dilihat pada tabel 2.10.

Tabel 2. 9 Koefisien Tekanan Eksternal 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

Tabel 2. 10 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

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

2.5.1.4.11 Tekanan Angin Desain (p)

Tekanan angin desain diperhitungkan berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 27.3.1 dan dapat dilihat pada persamaan 2.12

$$p = q G C_p - q_i G C_{pi} \quad (2.12)$$

Keterangan:

q = tekanan velositas pada ketinggian z (N/m²)

G = faktor hembusan angin

C_p = koefisien tekanan eksternal

G C_{pi} = koefisien tekanan internal

2.5.1.4.12 Syarat Beban Angin Desain Minimum

Berdasarkan SNI 1727-2020 pasal 27.1.5 beban angin yang digunakan dalam beban angin desain untuk bangunan tertutup dan tertutup sebagian tidak diizinkan lebih kecil dari 0,77 kN/m².

2.5.1.5 Beban Hidrostatik

Beban hidrostatik merupakan beban yang timbul akibat zat cair yang diam dan dipengaruhi kedalaman.

$$m_f = \rho \times V \quad (2.13)$$

Keterangan:

m_f = massa zat cair (kg)

ρ = massa jenis zat cair (kg/m³)

V = volume zat cair (m³)

Sehingga untuk mendapatkan beban hidrostatis akibat zat cair adalah sebagai berikut:

$$P_h = m_f \times g \quad (2.14)$$

Keterangan:

P_h = beban hidrostatis (N)

m_f = massa zat cair (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.5.2 Beban Dinamik

Beban dinamik merupakan beban yang berubah-ubah baik besaran, arah, maupun posisinya. Beban dinamik berubah berdasarkan fungsi waktu. Umumnya, beban ini tidak bersifat tetap dan memiliki karakteristik besaran dan arah yang berubah dengan cepat. Deformasi pada struktur akibat beban dinamik ini juga akan berubah-ubah secara cepat. Dalam penelitian ini yang termasuk beban dinamik adalah beban gempa dan beban hidrodinamik.

2.5.2.1 Beban Gempa

Berdasarkan SNI-1726-2019 dalam perhitungan besar beban gempa terdapat dua analisis yang dapat digunakan yaitu analisis statis dan dinamis. Dimana masing-masing analisis ini akan menghasilkan parameter gempa sehingga menghasilkan beban gempa. Analisa statik didasarkan oleh gaya geser pada dasar struktur rancangan, dalam analisis ini gaya geser didistribusikan ke seluruh tinggi bangunan tersebut. Sedangkan analisis dinamik ditentukan dengan analisis respon spektrum dan analisis riwayat waktu. Dalam penentuan besar beban gempa diperlukan perhitungan maupun penetapan parameter beban gempa.

2.5.2.1.1 Faktor Keutamaan dan Kategori Resiko

Faktor keutamaan gempa adalah suatu nilai parameter yang menyatakan sebuah prioritas bangunan untuk dapat digunakan kembali setelah gempa terjadi. Sedangkan kategori resiko adalah suatu nilai parameter yang menyatakan bahaya yang dapat ditimbulkan ketika bangunan tersebut menerima beban gempa atau ketika bangunan tersebut dapat runtuh. Kategori resiko dapat dilihat dari fungsional suatu bangunan. Nilai kategori resiko diatur dalam SNI 1726-2019 seperti pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Kategori Resiko

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
Gedung dan non gedung yang memiliki resiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, antara lain: Fasilitas pertanian, perkebuanan, peternakan, dan perikanan Fasilitas sementara Gudang penyimpanan Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk kategori resiko I, III dan IV Perumahan Rumah toko dan rumah kantor Pasar Gedung perkantoran Gedung apartemen/ rumah susun Pusat perbelanjaan/mall Bangunan industry Fasilitas manufaktur Pabrik	II
Gedung dan non gedung yang memiliki resiko terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
Bioskop Gedung pertemuan Stadion Fasilitas Kesehatan yang memiliki unit bedah dan unit gawat darurat Fasilitas penitipan anak Penjara Bangunan untuk orang jompo	
Gedung dan non gedung yang ditunjukan sebagai fasilitas yang penting Bangunan-bangunan monumental Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan Rumah ibadah Rumah sakit dan fasilitas lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi. Pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat Pusat pembangkit energi dan fasilitas public lainnya yang dibutuhkan saat darurat Struktur tambahan	IV
Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk dalam kategori resiko IV	IV

Sedangkan faktor keutamaan gempa juga diatur dalam SNI 1726-2019 dan dapat digolongkan sesuai Tabel 2.12.

Tabel 2. 12 Faktor Keutamaan

Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa, I
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

2.5.2.1.2 Klasifikasi Jenis Tanah

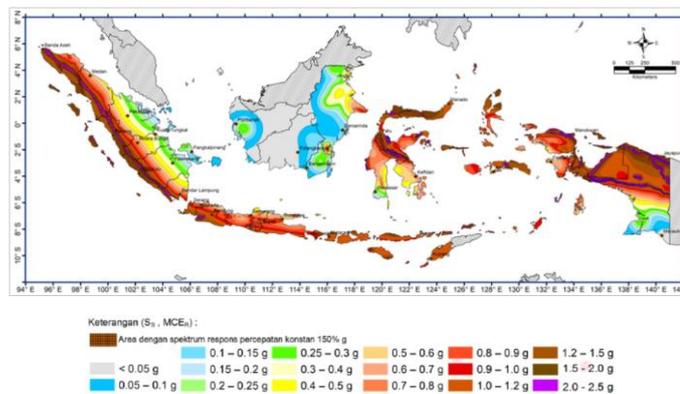
Penentuan kelas ini harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan laboratorium. Berdasarkan SNI 1726-2019 kelas situ dibagi seperti Tabel 2.13.

Tabel 2. 13 Klasifikasi Kelas Situs

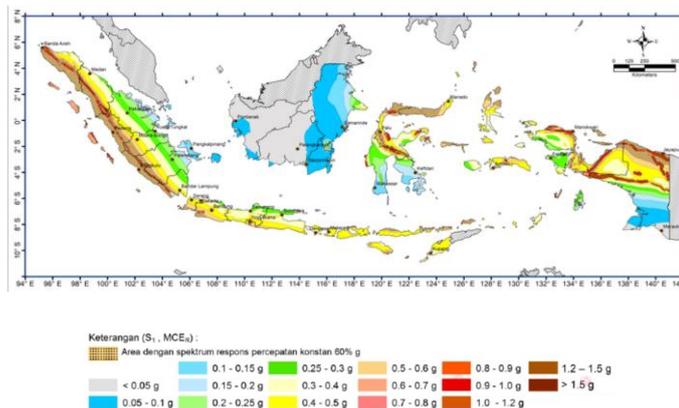
Kelas Situs	$\bar{V}_s (m / s)$	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	$\bar{S}_u (kPa)$
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	$\geq 100 \text{ kN/m}^2$
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100 kN/m^2
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50 kN/m^2
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25 \text{ kPa}$		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 \text{ m}$) 		

2.5.2.1.3 Parameter Percepatan Gempa Batuan Dasar

Terdapat parameter S_s dan S_1 . Dimana S_s merupakan parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R untuk periode pada saat 0,2 detik sedangkan S_1 merupakan parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R untuk pada saat periode 1 detik. Data bisa didapatkan secara manual melalui peta parameter pergerakan tanah S_1 dan S_2 pada SNI 1726-2019 ataupun data bisa didapatkan melalui aplikasi Desain Spektra Indonesia. Peta parameter untuk S_s dan S_1 diatur dalam SNI 1726-2019 sesuai dengan Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2. 5 Peta Parameter S_s



Gambar 2. 6 Peta Parameter S_1

2.5.2.1.4 Koefisien Situs

Koefisien situs adalah nilai koefisien untuk merambatkan percepatan gempa lapisan batuan ke lapisan permukaan. Koefisien ini untuk menentukan respons spektral percepatan gempa di permukaan tanah. Koefisien situs F_a dan F_v dapat dilihat pada SNI 1726-2019 seperti pada Tabel 2.14 dan 2.15.

Tabel 2. 14 Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter Respons Spectral Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan Pada Periode 1 Detik S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS^b				

Tabel 2. 15 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter Respons Spectral Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan Pada Periode $T=0,2$ Detik S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS^b				

2.5.2.1.5 Parameter Spektrum Respon Percepatan

Percepatan gempa pada permukaan tanah. Parameter spektrum respon percepatan pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs ditentukan dengan rumus:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.15)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (2.16)$$

2.5.2.1.6 Parameter Percepatan Spektral Desain

Merupakan parameter percepatan gempa rencana sesuai dengan SNI 1726-2019.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.17)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.18)$$

2.5.2.1.7 Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik dapat ditentukan berdasarkan parameter respon percepatan dan kategori resiko. Pada dasarnya kategori desain seismik berkaitan dengan jenis tanah, fungsi bangunan dan level bahaya gempa. Kategori desain seismik dimaksudkan agar suatu bangunan dapat memenuhi pendetailan yang sesuai dengan intensitas gempa yang diperkirakan. Berdasarkan SNI 1726-2019 kategori desain seismik seperti pada Tabel 2.16 dan 2.17.

Tabel 2. 16 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{DS}

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

Tabel 2. 17 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Nilai S_{D1}

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

2.5.2.1.8 Periode Struktur

Periode fundamental adalah waktu yang dibutuhkan oleh struktur untuk melakukan satu siklus ayunan dalam satuan detik (Hardiyatmo, 2022). Pada umumnya bangunan tinggi memiliki periode fundamental yang besar., bangunan yang tinggi memiliki periode fundamental yang lebih lama. Periode alami struktur juga dipengaruhi oleh ketidakberaturan, jumlah lantai, dimensi rangka bangunan, posisi dan panel antar ruang pada bangunan, dan lain-lain. Oleh karena itu, peraturan bangunan mengenai gempa menyediakan berbagai rumus pendekatan untuk menghasilkan nilai periode fundamental suatu struktur bangunan. Pada dasarnya periode fundamental struktur dapat dihasilkan dari *software*, namun terdapat nilai batasan yang ditentukan oleh SNI 1726-2019. Batasan ini dikarenakan periode fundamental yang dihasilkan oleh pendekatan akan menghasilkan nilai yang lebih kecil dibanding dengan hasil perhitungan *software*. Hal ini akan membuat nilai gaya geser dasar V bernilai besar. Periode fundamental pendekatan (T_a) yang merupakan nilai batas bawah memiliki perumusan sebagai berikut:

$$T_a = C_t \times (h_n)^x \quad (2.19)$$

Keterangan :

T_a = periode pendekatan fundamental (detik)

C_t = parameter periode pendekatan

x = parameter periode pendekatan

Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x diatur dalam SNI 1726-2019 pasal 7.8.2.1 seperti pada Tabel 2.18.

Tabel 2. 18 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 dikenakan gaya seismik:		
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sedangkan nilai batas atas dari periode fundamental adalah:

$$T = C_u \times T_a \quad (2.20)$$

Keterangan :

T = periode fundamental (detik)

C_u = koefisien periode batas atas

T_a = periode pendekatan fundamental (detik)

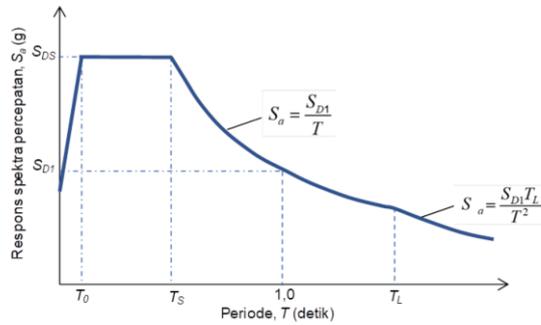
Dengan nilai C_u yang diatur pada SNI 1726-2019 seperti pada Tabel 2.19.

Tabel 2. 19 Koefisien Periode Batas Atas

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

2.5.2.1.9 Desain Respon Spektrum

Pada SNI 1726-2019 menyarankan bentuk spektrum respon rancangan sesuai dengan yang tertera pada pasal 6.4 seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 7 Spektrum Respon yang disarankan
Nilai ketentuan T_0 , T_s , T_L

$$T_0 = 0,2 \times \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.21)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.22)$$

$$T_L = T_L \quad (2.23)$$

Percepatan S_a , pada periode $T < T_0$

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.24)$$

a. Untuk S_a pada rentang periode $T_0 < T < T_s$ nilai S_a adalah konstan sebesar S_{DS}

b. Percepatan S_a pada rentang periode $T_s < T < T_L$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.25)$$

Percepatan S_a pada rentang periode $T > T_L$

$$S_a = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2} \quad (2.26)$$

2.5.2.1.10 Koefisien Rancangan

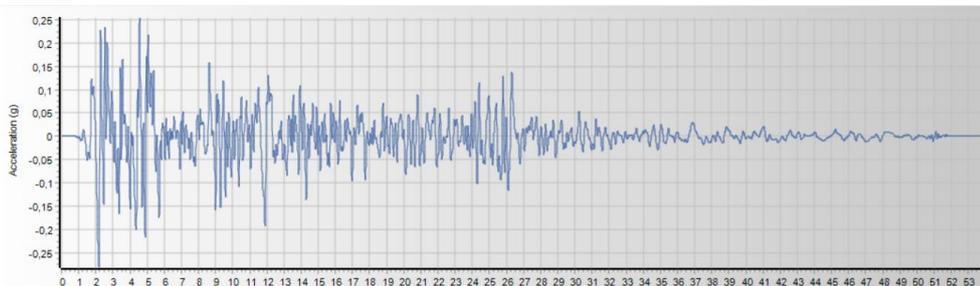
Koefisien rancang terdiri dari faktor modifikasi respon (R), faktor reduksi pengaruh daktilitas dari sistem (R_d), dan faktor kuat lebih sistem (Ω_o). Faktor modifikasi respon (R) digunakan untuk mereduksi kekuatan lateral dari struktur dengan mempertimbangkan karakteristik dari sistem yang dipilih. Besar nilai koefisien rancang diatur dalam SNI 1726-2019 sesuai dengan Tabel 2.20.

Tabel 2. 20 Koefisien Rancangan

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R^a	Ω_o	C_d^c	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, hn (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	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka barang baja pemikul momen khusus	7	3	5,5	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4,5	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3,5	3	3	TB	TB	TI'	TI'	TI'
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5,5	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2,5	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan bautan	3,5	3	3,5	10	10	10	10	10

2.5.2.1.11 Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu merupakan suatu metode analisa beban gempa yang menggunakan rekaman gempa asli yang dicatat oleh alat perekam gempa (Lesmana, 2020). Pada analisis riwayat waktu prosedur yang paling penting adalah penyetaraan intensitas gempa. Proses ini bisa dilakukan dengan metode *time history scaling* ataupun *spectral matching*. Untuk metode *spectral matching* diatur dalam SNI 1726-2019 pada pasal 7.9.2. Untuk analisa riwayat waktu diperlukan paling sedikit tiga data *ground motion*. *Ground motion* yang dipilih harus memiliki bentuk yang serupa dengan respon spektra pada lokasi tertentu. Data *ground motion* bisa didapatkan dari *website* Peer Berkeley yang disediakan oleh University of California Berkeley dan setelah dibuat grafik dengan bantuan *Software* SeismoMatch maka data percepatan tanah menjadi seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 8 Data Ground Motion El Centro

2.5.2.2 Beban Harmonik Sinus

Beban harmonik sinus merupakan beban yang berbentuk gerakan osilasi yang dihasilkan oleh gerakan suatu benda. Pola beban harmonik sinus memiliki pola pembebanan yang seragam sehingga tidak terdapat perubahan yang besar pada jangka waktu tertentu. Beban harmonik sinus bisa dihasilkan oleh gerakan rotasi mesin akibat adanya eksentrisitas massa yang berotasi. Walaupun putaran mesin tidak bersifat harmonik secara sempurna namun anggapan bahwa mesin berotasi secara harmonik dapat dipakai. Struktur yang dibebani oleh beban harmonik sinus

merupakan struktur yang dibebani oleh gaya atau perpindahan yang besarnya dinyatakan oleh suatu fungsi sinus.

$$\ddot{u}_g = \ddot{u}_{go} \sin \omega t \quad (2.27)$$

$$\ddot{u}_g = \ddot{u}_{go} \sin \frac{2\pi}{T_g} t \quad (2.28)$$

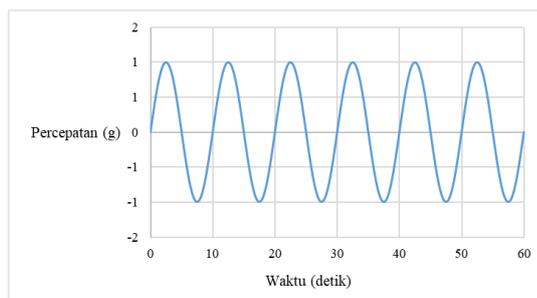
$$\ddot{u}_g = \ddot{u}_{go} \sin(2\pi f_g) t \quad (2.29)$$

Keterangan:

\ddot{u}_g = percepatan beban sinus (g)

\ddot{u}_{go} = amplitudo percepatan (g)

f_g = frekuensi (Hz)



Gambar 2. 9 Beban Sinus 0,1 Hz

2.5.2.3 Beban Hidrodinamik

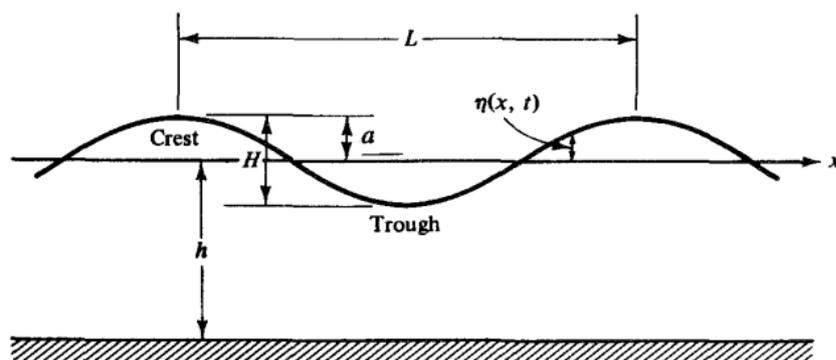
2.5.2.3.1 Penelitian Mengenai Tangki Air Pada Struktur

Kelakuan air dalam tangki yang diberi beban gempa pertama kali diteliti (G. Housner, 1963), kelakuan air dibagi menjadi dua bagian. Bagian atas yang bergerak secara *sloshing* dan bagian bawah yang bergerak bersama dengan tangki. Pergerakan dua bagian ini diidealisasikan dengan *spring mass system*. Selanjutnya teori tersebut diadopsi untuk mengimplementasikan perhitungan TLD (*Tuned Liquid Damper*) dengan memanfaatkan gerakan *sloshing* air. Penelitian pengaruh TLD pada bangunan pertama kali dilakukan dengan menggunakan dua jenis cairan yang berbeda untuk mengurangi getaran pada gedung (Bauer, 1984

dalam Rana et al., 2023). Pemasangan TLD pada *Tokyo International Airport Tower* dapat mereduksi vibrasi yang terjadi pada bangunan dengan meningkatkan redaman gedung sampai 7,6% (Fujii et al., 1990 dalam Rana et al., 2023). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan MTLTD akan lebih efektif jika ketinggian air adalah $\frac{3}{4}$ dari ketinggian tangki. Perletakan dari MLTD lebih efektif ketika terdapat satu tangki pada pusat bangunan dan yang lainnya tersebar secara merata. Tangki air dapat berperan sebagai peredam dengan mengatur ketinggian air (Ishak et al., 2021). Penelitian menggunakan satu tangki yang diletakan dilantai paling atas bangunan juga dapat berfungsi sebagai peredam dengan memerhatikan parameter TLD. Efek TLD lebih signifikan hanya pada zona resonansi. Penurunan respon struktur sebanyak 45%-50% ditemukan saat frekuensi gempa sama dengan frekuensi natural dari bangunan. Sedangkan selama tidak terjadi resonansi maka TLD tidak akan terlalu bekerja secara efektif. Efektifitas dari TLD juga lebih terlihat pada bangunan dengan banyak tingkat (Rana et al., 2018). Berdasarkan penelitian efektifitas dari tangki air dalam mereduksi getaran juga dipengaruhi oleh parameter *depth ratio* yang efektif pada rentang nilai 0,2 sampai 0,4 (Ramdani et al., 2023). Meningkatnya nilai parameter *mass ratio* maka akan semakin meningkat juga efektifitas TLD dan paling optimum pada nilai 2% (Rana et al., 2018). Nilai *mass ratio* yang efektif untuk digunakan adalah diantara 1%-5% (Ocak et al., 2022). Peningkatan jumlah tingkat bangunan juga dapat mempengaruhi efektifitas TLD. Penelitian yang dilakukan menghasilkan bahwa TLD pada bangunan tiga tingkat dapat mereduksi *displacement* 64% sedangkan pada bangunan dua belas tingkat dapat mereduksi *displacement* 84% (Sebastian & Kurian, 2017).

2.5.2.3.2 Fenomena *Sloshing*

Air dapat bergerak ketika menerima gangguan. Fenomena *sloshing* merupakan reaksi air ketika diberi suatu gangguan, sehingga air dengan permukaan bebas akan mengalami gerakan osilasi. Pada suatu bangunan bertingkat dengan bak air, gangguan yang dimaksud dapat berupa beban lateral berupa gempa. Karakteristik gerakan *sloshing* bergantung pada bentuk bak air, kedalaman air pada bak, dan besaran gempa yang diterima struktur. Pada dasarnya gelombang yang terbentuk akibat fenomena *sloshing* tidak selalu memiliki bentuk maupun periode yang sama. Sehingga, beberapa teori yang ada hanya akan menggambarkan bentuk gelombang yang sederhana dan merupakan pendekatan dari gelombang yang terjadi sebenarnya. Teori Gelombang Airy biasanya digunakan untuk dapat mengestimasi karakteristik dari gelombang air dan juga efeknya. Skema gelombang Airy dapat dilihat dapat dilihat pada Gambar 2.6. (Dean & Dalrymple, 1991 dalam Ramdani et al., 2023)



Gambar 2. 10 Skema Gelombang

Berdasarkan teori gelombang Airy, besar frekuensi natural dari gerakan *sloshing* dapat didefinisikan dengan pendekatan:

$$\omega^2 = g k \tanh kh \quad (2.30)$$

Dengan nilai k

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.31)$$

Keterangan:

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

h = Kedalaman air

λ = Panjang satu gelombang (m)

Pendekatan frekuensi *sloshing* juga diberikan oleh Housner 1963, dengan menganggap bagian air yang berosilasi hanya pada bagian tertentu dari air pada tangki. Bagian air yang mengalami *sloshing* ini dinamakan dengan bagian air *convective*.

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = 2\pi \frac{\sqrt{L}}{\lambda} \quad (2.32)$$

$$\lambda = \sqrt{3,16 g \tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right]} \quad (2.33)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3,16 g \frac{\tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right]}{L}} \quad (2.34)$$

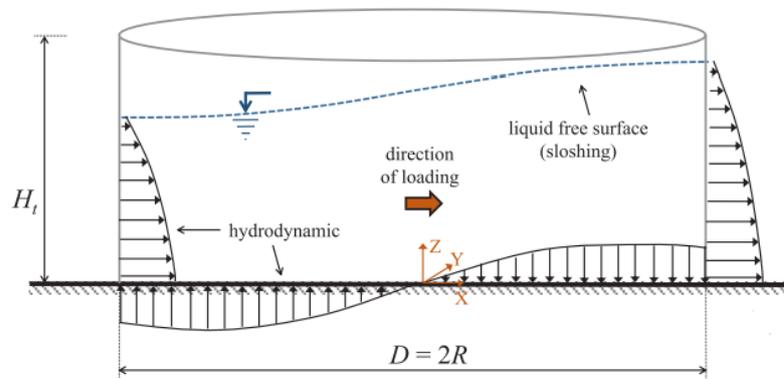
Keterangan:

T_c = Periode *convective*

L = Panjang atau lebar tangki

H = Kedalaman air tangki

Pada beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai TLD dimana bak air pada bangunan diatur memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi alami dari struktur dapat mengurangi perpindahan yang terjadi pada struktur ketika dibebani beban gempa. Hal ini dikarenakan air dapat menyerap energi vibrasi yang dialami gedung dengan gerakan *sloshing* yang menyebabkan air memberikan tekanan dan tarikan pada dinding tangki seperti pada Gambar 2.7 (Bakalis & Karamanos, 2021).

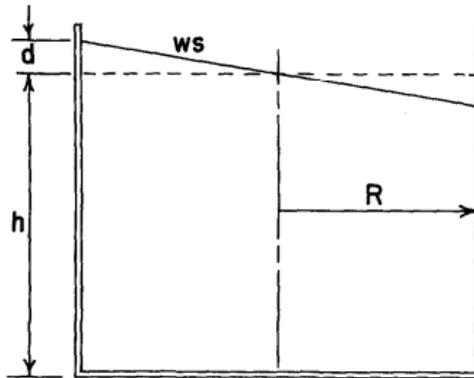


Gambar 2. 11 Beban Hidrodinamik Ekuivalen

2.5.2.3.3 *Spring Mass System*

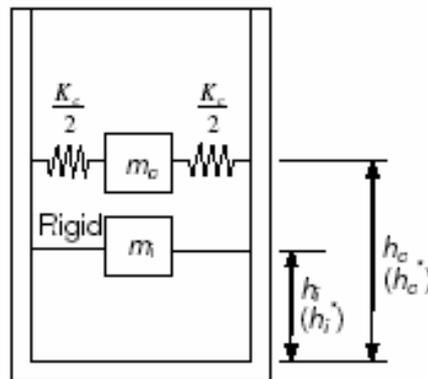
Beban dinamis yang dihasilkan oleh air berupa beban hidrodinamik. Beban hidrodinamik adalah beban yang disebabkan oleh adanya gelombang atau pergerakan pada air. Pada saat terjadi gempa, gaya lateral menyebabkan bak dan air yang ada didalamnya mengalami percepatan secara horizontal. Pergerakan pada air ini dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama dimana air yang berada dibawah mengalami percepatan yang sama dengan percepatan bak, sehingga membuat air bergerak secara linear dengan bak atau dapat dikatakan terhubung kaku dengan dasar bak. Bagian kedua yaitu merupakan bagian yang berada diatas bagian pertama. Bagian kedua ini, dimana air tidak bergerak bersamaan dengan bak maupun air pada bagian pertama, melainkan menimbulkan gerakan *collinear* yang

disebut sebagai gerakan *sloshing*. Sistem dinamik dalam bak dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Housner, 1963).



Gambar 2. 12 Sistem Dinamik Ekuivalen untuk Tangki Air

Untuk memudahkan analisis maka pergerakan air pada tangki yang diberikan beban lateral diidealisasikan sebagai pegas dan massa terpusat (Housner, 1963). Dimana bagian pertama pada air disebut sebagai *impulsive mass* sedangkan bagian kedua disebut sebagai *convective mass*. *Impulsive mass* diidealisasikan terhubung secara kaku dengan dinding bak. Sedangkan *convective mass* diidealisasikan terhubung dengan dinding bak dengan pegas. Sistem massa pegas dapat dilihat pada Gambar 2.9 (Housner, 1963).



Gambar 2. 13 *Spring Mass System*

Dengan besar masing-masing parameter dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$m_i = m_f \times \frac{\tanh \left(\sqrt{3} \times \left(\frac{L}{2 \times h_f} \right) \right)}{\sqrt{3} \times \left(\frac{L}{2 \times h_f} \right)} \quad (2.35)$$

$$m_c = m_f \times \frac{0,83 \times \tanh \left(1,6 \times h_f \times \left(\frac{L}{2} \right) \right)}{1,6 \times h_f \times \left(\frac{L}{2} \right)} \quad (2.36)$$

$$h_i = 0,38 \times h_f \times \left[1 + \alpha \left(\frac{m_f}{m_i} - 1 \right) \right] \quad (2.37)$$

$$= h_f \times \left[1 - 0,33 \times \frac{m_f}{m_i} \times \left(\frac{L}{2 \times h_f} \right)^2 + 0,63 \times \beta \frac{L}{2 \times h_f} \times \right] \quad (2.38)$$

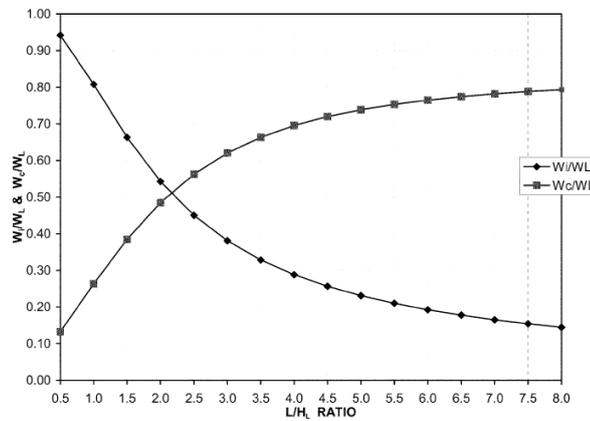
$$h_c = \sqrt{0,28 \times \left(\frac{m_f \times L}{m_c \times h_f} \right) + 1}$$

$$k = \frac{3 \times g \times m_c^2 \times h_f}{m_f \times L^2} \quad (2.39)$$

2.5.2.3.4 Pengadopsian *Spring Mass System*

Setelah gagasan *spring mass system* diperkenalkan pertama kali oleh Housner (1963) sehingga akhirnya banyak peraturan yang menggunakan gagasan ini sebagai dasar pemikiran dan penetapan rumus. Beberapa aturan yang dibuat berdasarkan gagasan yang diberikan oleh Housner dan telah mengalami pembaharuan ataupun penyesuaian antara lain adalah IITK GSDMA 2007, IS 1983-2016 (*part 2*) dan ACI 350.3-20. Pada ACI 350.3-20 terdapat beberapa penyesuaian yang dibuat antara lain ialah pendekatan persamaan ketinggian massa *impulsive* dan ketinggian massa *convective*. Selain itu, parameter lainnya juga disajikan sebagai grafik untuk mempermudah perhitungan.

Berdasarkan ACI 350.3-20 grafik mengenai faktor massa *impulsive* dan *convective* terhadap rasio L/H dapat dilihat pada Gambar 2.10.

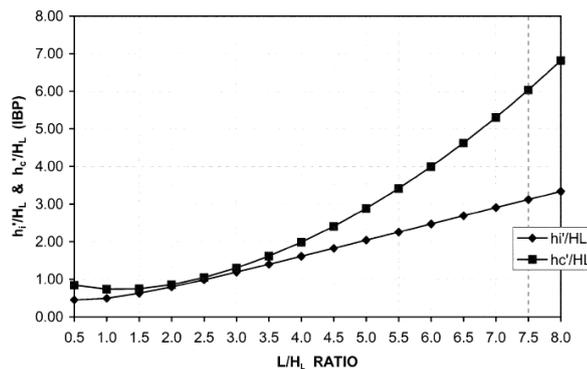


Gambar 2. 14 Faktor Massa *Impulsive* dan *Convective* Terhadap Rasio L/H

$$\frac{W_i}{W} = \frac{\tanh \left(0,866 \left(\frac{L}{H} \right) \right)}{0,866 \left(\frac{L}{H} \right)} \quad (2.40)$$

$$\frac{W_c}{W} = 0,264 \left(\frac{L}{H} \right) \tanh \left[3,16 \left(\frac{H}{L} \right) \right] \quad (2.41)$$

Berdasarkan ACI 350.3-20 grafik mengenai faktor ketinggian *impulsive* dan *convective* terhadap rasio L/H dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 15 Faktor Ketinggian *Impulsive* dan *Convective* Terhadap Rasio L/H
Persamaan h_i untuk tangki yang memiliki rasio L/H < 0,75

$$\frac{h_i}{H} = 0,45 \quad (2.42)$$

Persamaan h_i untuk tangki yang memiliki rasio $L/H > 0,75$

$$\frac{h_i}{H} = \frac{0,866 \left(\frac{L}{H}\right)}{2 \tanh \left[0,866 \left(\frac{L}{H}\right)\right]} - \frac{1}{8} \quad (2.43)$$

Sedangkan persamaan untuk h_c untuk semua jenis tangki adalah:

$$\frac{h_i}{H} = 1 - \frac{\cosh \left[3,16 \left(\frac{H}{L}\right)\right] - 2,01}{3,16 \left(\frac{H}{L}\right) \sinh \left[3,16 \left(\frac{H}{L}\right)\right]} \quad (2.44)$$

2.5.2.3.5 Pengimplementasian Model Pada SAP 2000

Beberapa penelitian telah dilakukan, MTLD yang dimodelkan pada atap bangunan berlaku sebagai *spring mass system* pada SAP 2000 (Ishak et al., 2021). *Nodes* disediakan pada SAP 2000 dengan ketinggian tertentu dibagian dalam tangki dan terhubung dengan tangki untuk memberikan interaksi air dengan dinding tangki (Jacob et al., 2018). Pada *nodes* yang telah dibuat akan dimasukan suatu massa yang masing-masing merepresentasikan *convective mass* dan *impulsive mass*. Bagian *node* yang dibebani *convective mass* akan dihubungkan dengan dinding tangki dengan bantuan *spring* yang dapat dimodelkan menggunakan *linear link* dengan suatu kekakuan pegas tertentu hasil perhitungan untuk arah x dan y. Sedangkan pada *node* yang dibebani *impulsive mass* akan dihubungkan dengan menggunakan *linear link* namun diatur dengan DOF yang tetap pada semua arah (Rana et al., 2018).

2.6 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan struktur atas mengacu pada SNI 1726-2019 pasal 4.2.2.1. Untuk struktur yang mengalami gaya lateral berupa gempa mendapat kombinasi beban tambahan sesuai dengan SNI 1726-2019 pasal 4.2.2.3.

Kombinasi 1: 1,4 D

Kombinasi 2: 1,2 D + 1,6 L + 0,5 R

Kombinasi 3: 1,2 D + 1,6 R + L

Kombinasi 4: 1,2 D + 1,6 R + 0,5 W

Kombinasi 5: 1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 R

Kombinasi 6: 0,9 D + 1,0 W

Kombinasi 7: 1,2 D + E_v + E_h + L

Kombinasi 8: 0,9 – E_v + E_h

Dengan E_v dan E_h adalah:

$$E_v = 0,2 S_{DS} D$$

$$E_h = \rho Q_E$$

Kombinasi pembebanan struktur bawah mengacu pada SNI 1726-2019 pasal 4.2.3.1. Untuk struktur yang mengalami gaya lateral berupa gempa mendapat kombinasi beban tambahan sesuai dengan SNI 1726-2019 pasal 4.2.3.3.

Kombinasi 1: D

Kombinasi 2: D + L

Kombinasi 3: D + R

Kombinasi 4: D + 0,75 L + 0,75 R

Kombinasi 5: D + 0,6 W

Kombinasi 6: D + 0,75 (0,6 W) + 0,75 L + 0,75 R

Kombinasi 7: 0,6 D + 0,6 W

Kombinasi 8: 1 D + 0,7 E_v + 0,7 E_h

Kombinasi 9: 1 D + 0,525 E_v + 0,525 E_h + 0,75 L

Kombinasi 10: $0,6 D - 0,7 E_v + 0,7 E_h$

Kombinasi 11: $1 D + 0,7 E_v + 0,7 E_{mh}$

Kombinasi 12: $1 D + 0,525 E_v + 0,525 E_{mh} + 0,75 L$

Kombinasi 13: $0,6 D - 0,7 E_v + 0,7 E_{mh}$

Dengan E_v , E_h dan E_{mh} adalah:

$$E_v = 0,2 S_{DS} D$$

$$E_h = \rho Q_E$$

$$E_{mh} = \Omega_o Q_E$$

2.7 Sistem Struktur

Struktur merupakan suatu rangkaian dari berbagai elemen yang dirakit sehingga menjadi satu kesatuan yang utuh dan saling berkaitan. Pada masing-masing elemen struktur biasanya akan dibebani oleh suatu beban tertentu. Elemen yang dimaksud dapat berupa lantai, dinding, kolom, balok dan lain sebagainya. Lantai dikenakan beban gravitasi beserta efeknya, dan sebagian besar permukaan ini harus memikul beratnya sendiri. Beban-beban ini cenderung mengubah permukaan bangunan sehingga mengakibatkan keruntuhan, untuk mencegah terjadinya hal tersebut maka diberikan suatu sistem struktur. Sistem struktur ditujukan untuk memberikan suatu kekuatan dan kekakuan yang diperlukan untuk mencegah terjadinya keruntuhan atau kegagalan struktur.

Sistem struktur bangunan merupakan penggabungan elemen struktur untuk dapat memikul beban yang diterima secara efektif serta menyalurkannya ke tanah dengan baik. Hal ini yang akan membuat struktur menjadi stabil dan memiliki kemampuan menahan beban lateral yang baik. Berdasarkan SNI beton, sistem dasar penahan beban lateral dapat dibedakan menjadi sistem rangka pemikul momen

(SRPM) dan sistem dinding struktural (SDS). Sistem rangka pemikul momen merupakan suatu sistem bangunan yang dimana setiap komponennya yang berupa balok, kolom, pelat dan jalin-jalinnya mampu menahan gaya-gaya yang diterima struktur dengan aksi lentur, geser, dan aksialnya.

2.7.1 Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)

Sistem portal terbuka dalam SNI sama juga disebut sistem rangka pemikul momen (SRPM). Portal terbuka berbentuk segi empat yang terdiri atas kolom dan balok yang monolit dan membentuk ruangan besar sehingga memberikan tahanan horizontal pada kerangka keseluruhan. Sistem portal terbuka atau sistem rangka kaku pada umumnya berupa garis persegi yang teratur dan memiliki sambungan kaku. Rangka ini bisa menjadi satu bidang dengan dinding interior bangunan, atau sebagian bidang dengan penutup bangunan. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.2 menyatakan bahwa Sistem Rangka Pemikul Momen dapat dikelompokkan menjadi:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 pasal 18.3. Pada pasal ini menyatakan bahwa SRPMB hanya bisa dikenakan untuk struktur pada KDS B. Sistem ini hanya memiliki tingkat daktilitas yang terbatas.

2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 pasal 18.4. Struktur yang termasuk kedalam struktur pada KDS C dapat menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM). Sistem ini hanya memiliki tingkat daktilitas menengah.

3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Merupakan suatu sistem rangka yang memenuhi ketentuan pada SNI 2847-2019 pasal 18.2.3 hingga 18.2.8 dan 18.6 hingga 18.8. Struktur yang termasuk kedalam struktur pada KDS D, E, atau F dapat menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Sistem ini memiliki tingkat daktilitas yang penuh.

2.7.2 Sistem Dinding Struktural (SDS)

Sistem Dinding Struktural (SDS) adalah suatu sistem dimana dinding digunakan untuk menahan kombinasi gaya geser, momen, dan aksial akibat terjadinya gempa. Suatu dinding geser (*shear wall*) pada dasarnya merupakan suatu sistem dinding struktural. Dinding geser (*shear wall*) merupakan unsur pengaku vertikal yang relatif sangat kaku yang dirancang agar dapat menahan gaya lateral (gempa) yang bekerja pada bangunan. *Shear Wall* pada umumnya memiliki ketentuan hanya boleh memiliki bukaan sekitar 5% agar kekakuan yang tersedia masih memenuhi syarat. Pada SNI 2847-2019 pasal 18.2.

1. SDSB (Sistem Dinding Struktural Biasa)

SDSB merupakan suatu sistem dinding struktural biasa yang bisa digunakan pada struktur dengan KDS C. Sistem ini memiliki tingkat daktilitas terbatas.

2. SDSK (Sistem Dinding Struktural Khusus)

SDSK merupakan suatu sistem struktural khusus yang biasa digunakan untuk struktur dengan KDS D, E, atau F. Sistem ini memiliki tingkat daktilitas tinggi. SDSK harus memenuhi syarat pada SNI 2847-2019 pasal 18.2.3 hingga 18.2.8 dan pasal 18.10.

2.8 Evaluasi Perilaku Struktur

2.8.1 Jumlah Ragam

Analisis pada struktur harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam berkontribusi sebesar paling sedikit 90% dari massa aktualnya, hal ini sesuai dengan ketentuan SNI 1726-2019 pasal 7.9.1.1 dan berlaku untuk masing-masing arah yang ditinjau. Jika nilai partisipasi massa belum memenuhi maka diharuskan untuk menambahkan jumlah ragam agar mencapai partisipasi massa yang ditentukan.

2.8.2 Ketidakberaturan Struktur

Ketidakberaturan struktur terdiri atas ketidakberaturan struktur horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal. Ketidakberaturan struktur vertikal diatur pada SNI 1726-2019 pasal 7.3.2.2 sedangkan untuk ketidakberaturan struktur horizontal diatur pada pasal 7.3.2.1.

Tabel 2. 21 Tipe Ketidakberaturan Struktur

Ketidakberaturan	Nomor	Tipe
Vertikal	1a	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya
Vertikal	1b	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan Didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya
Vertikal	2	Ketidakberaturan Berat (Massa) Didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau
Vertikal	3	Ketidakberaturan Geometri Vertikal Didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat di dekatnya

Ketidakberaturan	Nomor	Tipe
Vertikal	4	<p>Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral</p> <p>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</p>
Vertikal	5a	<p>Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat</p> <p>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</p>
Vertikal	5b	<p>Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat</p> <p>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</p>
Horizontal	1a	<p>Ketidakberaturan Torsi</p> <p>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 diafragma kaku atau setengah kaku</p>
Horizontal	1b	<p>Ketidakberaturan Torsi Berlebihan</p> <p>Didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragma kaku atau setengah kaku</p>
Horizontal	2	<p>Ketidakberaturan Sudut Dalam</p> <p>Didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau</p>

Ketidakteraturan	Nomor	Tipe
Horizontal	3	Ketidakteraturan Diskontinuitas Diafragma 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
Horizontal	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
Horizontal	5	Ketidakteraturan Sistem Nonparallel Didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik

2.8.3 Skala Gempa

Berdasarkan ketentuan SNI 1726-2019 pasal 7.9.4.1 menyebutkan bahwa gaya geser dasar dinamik harus lebih besar dari 100% gaya geser statiknya. Gaya geser dasar dinamik yang dimaksud adalah hasil analisis respon spektrum maupun riwayat waktu. Bila gaya geser dasar dinamik bernilai lebih kecil dari gaya geser statiknya maka harus dilakukan penyesuaian.

$$S_{lax} = \frac{V}{V_{dx}} \quad (2.45)$$

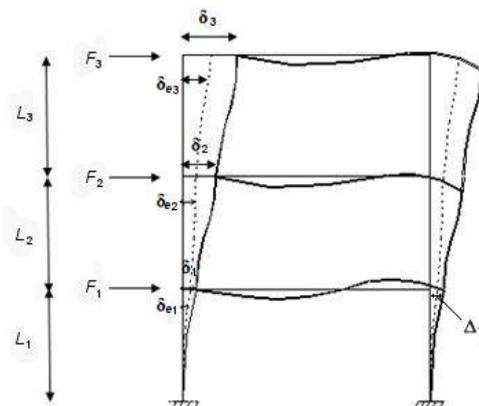
$$S_{lay} = \frac{V}{V_{dy}} \quad (2.46)$$

$$\text{Faktor Skala } x = \left(g \times \frac{I_c}{R} \right) \times \left(\frac{v}{V_{dx}} \right) \quad (2.47)$$

$$\text{Faktor Skala } y = \left(g \times \frac{I_e}{R} \right) \times \left(\frac{v}{V_{dy}} \right) \quad (2.48)$$

2.8.4 Simpangan Antar Tingkat

Simpangan adalah perpindahan lateral yang relatif antara dua tingkat bangunan atau simpangan mendatar tiap tingkat bangunan yang diukur dari lantai dibawahnya. Simpangan antar tingkat dihitung sebagai selisih terbesar dari defleksi titik-titik diatas dan dibawah tingkat yang ditinjau dan letaknya segaris secara vertikal. Pada SNI 1726-2019 pasal 7.8.6 dijelaskan bahwa simpangan antar tingkat harus dihitung berdasarkan perbedaan simpangan yang terjadi pada pusat massa diatas dan dibawah tingkat yang ditinjau. Parameter yang dibutuhkan untuk memperhitungkan simpangan antar tingkat adalah I_e dan C_d . Faktor keutamaan struktur gedung atau I_e dapat diambil nilainya sesuai dengan ketentuan untuk jenis bangunan yang tercantum dalam SNI 1726-2019 pasal 4.1.2. Sedangkan C_d merupakan faktor amplifikasi defleksi atau faktor pembesaran simpangan lateral. Berdasarkan SNI 1726-2019 simpangan yang terjadi pada struktur dapat dilihat seperti Gambar 2.21.



Gambar 2. 16 Penentuan Simpangan Antar Tingkat

Simpangan pusat massa di tingkat ke-x harus dihitung dengan persamaan:

$$\Delta x = C_d \frac{\delta_{xe}}{I_e} \quad (2.49)$$

Dengan δ merupakan perbedaan *displacement* yang terjadi pada tingkat ke-n dengan tingkat dibawahnya. Dalam ketentuan SNI 1726-2019 mengatur bahwa simpangan antar tingkat desain yang terjadi tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin. Berdasarkan SNI 1726-2019 simpangan antar tingkat izin seperti pada Tabel 2.22.

Tabel 2. 22 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 lantai tingkat	0,025h _{sx} ^c	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}
Struktur dinding geser kantilever atau bata	0,010h _{sx}	0,010h _{sx}	0,010h _{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007h _{sx}	0,007h _{sx}	0,007h _{sx}
Semua struktur lainnya	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}	0,010h _{sx}

Dengan nilai h_{sx} merupakan tinggi tingkat dibawah tingkat ke-x. Selain itu nilai *displacement* yang terjadi juga harus dilakukan control. Hasil *displacement* yang diperoleh dari analisis SAP 2000 tidak boleh melebihi H/240.

2.9 Detailing Kebutuhan Tulangan

2.9.1 Detailing Tulangan Pelat

Pelat dua arah merupakan pelat yang mengalami lendutan pada dua arah bentangnya. Tulangan lentur yang perlu disediakan pada pelat juga harus dipasang pada dua arah yang saling tegak lurus. Luasan minimum tulangan lentur ($A_{s \text{ min}}$) untuk pelat dua arah diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 8.6.1 seperti dalam Tabel 2.23.

Tabel 2. 23 Luas Tulangan Pelat Minimum

Jenis Tulangan	f_y (MPa)	$A_{s \text{ min}}$ (mm)	
Batang ulir	< 420	0,0020 A_g	
Batang ulir atau kawat las	≥ 420	Terbesar dari	$\frac{0,0018 \times 420}{f_y} A_g$
			0,0014 A_g

Sedangkan untuk spasi tulangan lentur pada pelat dua arah diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 8.7.2 yang menyatakan bahwa spasi minimal harus sesuai dengan pasal 25.2 yaitu tidak kurang dari nilai terbesar dari 25 mm, d_b , dan $(4/3) d_{agg}$. Sedangkan jarak spasi maksimal harus diambil yang terkecil dari $3h$ dan 450 mm pada penampang. Adapun rumus luas tulangan pelat yang digunakan:

$$A_s = \rho \times b \times d \quad (2.50)$$

$$A_s = \frac{1}{n} \times \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \quad (2.51)$$

2.9.2 Detailing Dinding Bak

Pada dasarnya perhitungan penulangan dinding bak renang mirip dengan perhitungan penulangan pelat lantai. Namun hal yang mendasari perbedaannya adalah pada beban yang bekerja pada masing-masing elemen. Pada pelat lantai beban yang umumnya bekerja adalah beban hidup dan beban mati. Sedangkan pada dinding bak beban yang bekerja adalah beban akibat tekanan yang diakibatkan oleh air (tekanan hidrostatis). Tekanan ini cenderung membentuk sebuah distribusi

tekanan berbentuk segitiga yang berbeda dengan pendistribusian beban pada pelat lantai. Pada pelat lantai beban didistribusikan secara merata. Oleh karena itu perhitungan momen harus dipengaruhi oleh adanya beban hidrostatis yang terjadi.

2.9.3 Detailing Tulangan Balok

Balok merupakan elemen utama struktur yang terpasang secara horizontal. Balok terhubung dengan kolom-kolom yang membuat struktur menjadi stabil dan dapat memikul beban. Fungsi utama dari balok adalah untuk menyalurkan beban dari pelat lantai ke kolom dalam bentuk gaya dan momen. Balok juga dapat berperan sebagai penahan gempa dengan cara menyerap energi gempa melalui sendi plastis.

Momen lentur, gaya geser, dan momen torsi merupakan gaya-gaya yang sangat mempengaruhi perilaku balok. Momen lentur pada balok menyebabkan balok membutuhkan tulangan lentur, sedangkan untuk mengantisipasi gaya geser balok membutuhkan tulangan geser. Balok juga menerima beban aksial, namun diabaikan karena tidak terlalu berpengaruh terhadap perilaku balok dan bernilai relatif kecil. Pada saat terjadi momen pada poros memanjang balok, balok akan mengalami puntir (torsi). Fenomena torsi ini yang menyebabkan balok membutuhkan tulangan torsi.

2.9.3.1 Detailing Tulangan Lentur Balok

Fenomena lentur menyebabkan timbulnya tegangan tarik dan tekan pada balok. Serat atas penampang muncul tegangan tekan, sedangkan serat bawah mengalami tegangan tarik. Pada saat balok memikul beban yang kecil, tegangan dan regangan yang terjadi akan sesuai dengan gambar. Kondisi disaat tegangan tarik dan tegangan tekan belum mencapai batas kekuatan dari materialnya (beton

maupun tulangan). Distribusi tegangan dan regangan berupa garis linear, sehingga balok masih berperilaku elastis.

Pada saat beban yang diberikan ditambahkan maka distribusi tegangan akan berubah. Perubahan diawali adanya perubahan tinggi garis netral serta bertambahnya tegangan-regangan tekan maupun tarik. Kondisi saat tegangan pada baja tulangan mencapai batas kuat lelehnya (f_y). Distribusi tegangan daerah tekan menjadi nonlinear karena tegangan tarik yang terjadi telah melampaui kekuatan beton. Pada kondisi ini terjadi retakan pada serat tarik. Lendutan yang terjadi sudah permanen meski beban dihilangkan, hal ini mengandung arti beton telah melewati batas elastisnya.

Ketika beban ditambahkan lagi setelah tegangan pada baja tulangan melampaui batas kuat lelehnya, maka tulangan baja akan mengalami tambahan regangan diikuti deformasi balok yang semakin besar. Hal ini dikarenakan kekuatan baja untuk memikul beban menjadi semakin mengecil. Balok dapat dikatakan runtuh ketika telah mencapai batas kekuatan maksimumnya ($\epsilon_{cu} = 0,003$). Terdapat beberapa persyaratan batas tulangan lentur minimum untuk balok nonprategang diatur dalam SNI 2847-2019.

1. Batasan lendutan yang terjadi tidak boleh melebihi lendutan izin maksimum yang diatur secara lengkap pada SNI 2847-2019 pasal 24.2.
2. Batasan regangan pada tulangan tarik balok memiliki batasan yang diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 9.3.3.1. Untuk balok yang memiliki nilai $P_u < 0,10(f'_c)(A_g)$ nilai regangan pada tulangan tariknya adalah sekurang-kurangnya $\epsilon_t = 0,004$.

3. Momen terfaktor (M_u) yang digunakan menurut SNI 2847-2019 pasal 9.4.2.1 mengisyaratkan bahwa nilai M_u diperkenankan dihitung pada muka tumpuan. Penggunaan nilai momen pada muka tumpuan dimaksudkan agar balok lebih ekonomis.
4. Perhitungan momen rencana harus disesuaikan dengan kategori balok. Berdasarkan besarnya gaya aksialnya balok dapat digolongkan menjadi dua. Bila $P_u < 0,01 \cdot f'c \cdot A_g$ maka perhitungan momen rencana harus sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 22.3. Sedangkan jika $P_u > 0,01 \cdot f'c \cdot A_g$ maka perhitungan momen rencana harus sesuai dengan SNI 2847-2019 pasal 22.4.
5. Pada SNI 2847-2019 pasal 9.6.1.2 yang mengatur mengenai luas tulangan minimal yang harus tersedia untuk elemen lentur balok adalah sebagai berikut:

$$A_{s \min} = \frac{0,25 \sqrt{f'c}}{f_y} b_w d \quad (2.52)$$

$$A_{s \min} = \frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.53)$$

Keterangan:

A_s = Luas tulangan tarik longitudinal (mm^2)

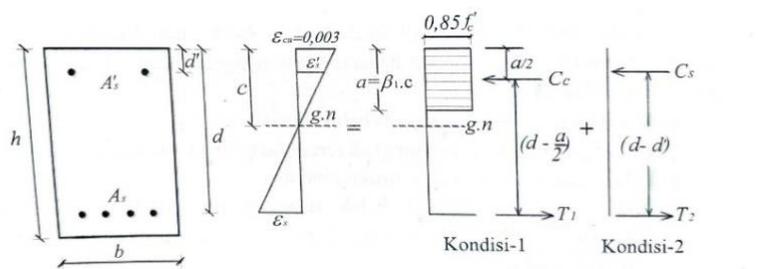
$A_{s, \min}$ = Luas minimum tulangan lentur (mm^2)

b_w = Lebar komponen struktur lentur (mm)

d = Tinggi efektif penampang komponen struktur lentur (mm)

Berdasarkan kebutuhan tulangannya, balok dapat bertulang tunggal ataupun bertulang rangkap. Balok tulangan rangkap merupakan balok yang memiliki tulangan tarik (A_s) dan tulangan tekan (A'_s) pada penampangnya. Beton

memiliki kuat tekan yang tinggi sehingga peran utama dari tulangan tekan yaitu untuk mengontrol deformasi, mengurangi pengaruh rangkak dan susut pada balok, serta meningkatkan daktilitas struktur balok. Dalam desain tulangan rangkap sama halnya dengan desain tulangan tunggal, yang menjadi perbedaan yaitu adanya sumbangan kekuatan dari tulangan tekan pada daerah tekan balok yang diberi notasi (*compression of steel*). Sedangkan untuk kuat tekan balok berawal dari C menjadi C_c (*compression of concrete*) agar menyesuaikan dengan variabel tulangan tekan. Konsep analisa tulangan rangkap pada balok dapat dilihat pada Gambar 2.13 (Lesmana, 2020).



Gambar 2. 17 Konsep Analisa Tulangan Rangkap
Balok tulangan rangkap memiliki tulangan tarik (A_s) pada daerah tegangan

tarik dan tulangan tekan (A'_s) pada sisi tegangan tekan. Jarak titik berat tulangan tekan (A'_s) terhadap serat tekan terluar dari penampang balok diberi notasi d' . Dengan adanya tulangan tekan maka regangan tulangan tekan juga diperhitungkan dengan notasi ϵ'_s . Adapun untuk mempermudah analisa tulangan rangkap, berikut mekanisme tegangan-regangan balok tulangan rangkap.

1. Kondisi 1

Pada kondisi ini belum memperhitungkan tulangan tekan dalam kontribusi kekuatan. Pada kondisi ini gaya tarik diubah menjadi T_1 yang menandakan gaya tarik pada kondisi 1. Penggunaan simbol T_1 dikarenakan gaya tarik dibagi menjadi dua yaitu T_1 dan T_2 . Sehingga dapat ditulis $T=T_1+T_2$.

$$T_1 = A_{s1} \cdot f_y \quad (2.54)$$

Gaya tekan beton (C_c)

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a \quad (2.55)$$

dimana $T_1 = C_c$ sehingga dapat ditulis:

$$M_{n1} = T_1 \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.56)$$

$$M_{n1} = A_{s1} \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.57)$$

sehingga tulangan tarik dapat ditulis:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.58)$$

2. Kondisi 2

Pada kondisi 2, parameter yang digunakan yaitu gaya tekan (C_s) yang disumbang oleh tulangan tekan (A'_s) dan gaya tarik (T_1) yang disumbang oleh tulangan tarik (A_{s1}). Posisi gaya C_s sejarak d' dengan serat terluar penampang balok sehingga lengan momen antara gaya tekan (C_s) dan gaya tarik (T_1) dari kondisi 2 ($d - d'$). Berikut penjelasan dari persamaan kondisi 2.

Gaya tulangan tarik (A_{s2}):

$$T_2 = A_{s2} \cdot f_y \quad (2.59)$$

Gaya tekan dari tulangan tekan (C_s):

$$C_s = A'_s \cdot f_s' \quad (2.60)$$

Dengan $T_2 = C_s$, dan f_s' adalah tegangan leleh pada tulangan tekan (A'_s).

Sehingga momen nominal pada kondisi 2:

$$M_{n2} = T_2 \times (d - d') \quad (2.61)$$

$$M_{n2} = A_{s2} \cdot f_y \times (d - d') \quad (2.62)$$

dengan tulangan tekan dapat ditulis:

$$A'_s = A_{s2} \quad (2.63)$$

Berdasarkan penjelasan kondisi 1 dan kondisi 2 maka dapat diperoleh nilai momen nominal (M_n) untuk balok tulangan rangkap:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.64)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.65)$$

dengan nilai C_c :

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

$$C_c = C_s - T = (A'_s \cdot f'_s) - (A_s \cdot f_y) \quad (2.67)$$

sehingga momen nominal menjadi:

$$M_n = (A'_s \cdot f'_s) - (A_s \cdot f_y) \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s \cdot f'_s) \cdot (d - d') \quad (2.68)$$

dengan persyaratan:

$\phi M_n > M_u$; dengan $\phi=0,9$ sebagai kontrol tarik

2.9.3.2 *Detailing Tulangan Geser Balok*

Akibat balok memikul beban maka hal tersebut menimbulkan momen dan juga gaya geser pada balok. Prinsip dasar desain geser balok adalah resultan tegangan geser vertikal pada penampang balok harus sama besar dengan gaya geser yang bekerja pada balok (V_u). Bila kondisi tersebut tidak tercapai maka akan terjadi keruntuhan atau kegagalan geser (*shear failures*).

Perhitungan kuat geser nominal (V_n) merupakan penjumlahan dari kuat geser yang disumbang oleh beton (V_c) dan kuat geser yang disumbang oleh tulangan geser (V_s), atau dalam persamaan sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.69)$$

Keterangan:

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 beton. (N)

Sedangkan untuk menentukan nilai V_c mengacu pada SNI 2847 2019; Pasal 22.5.5.5 dengan persamaan berikut:

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.70)$$

Nilai V_s diambil mengacu pada persamaan berikut:

$$V_s = A_v f_{yt} d s \quad (2.71)$$

dengan nilai V_s disarankan tidak boleh diambil lebih besar dari persamaan:

$$V_s = 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.72)$$

Keterangan:

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

A_v = luas tulangan sengkang (mm^2)

f_{yt} = kuat tarik baja tulangan (N/mm^2)

d = tinggi efektif balok beton bertulang (mm)

s = jarak antar tulangan sengkang (mm)

f'_c = kuat tekan beton bertulang (N/mm^2)

b_w = lebar efektif balok beton (mm)

d = tinggi efektif balok beton (mm)

Dalam metode desain geser berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 9.5.1.1, persyaratan geser nominal adalah:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.73)$$

Keterangan :

V_n = gaya geser nominal balok (N)

V_u = gaya geser ultimate balok (N)

ϕ = faktor reduksi geser sebesar 0,75

Pada pengaplikasiannya, luasan tulangan geser (A_v) diharapkan tidak terlalu kecil dan terlalu besar, guna mencegah keruntuhan akibat getas, juga memastikan tulangan geser mengalami leleh saat terjadi retak atau daktil.

Maka dari itu, nilai untuk A_v dapat diambil dengan persamaan berikut sesuai SNI 2847 2019; Pasal 9.6.3.3.

$$A_{v \min} = 0,062 \cdot \sqrt{f_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.74)$$

atau

$$A_{v \min} = \frac{0,35 b_w s}{f_{yt}} \quad (2.75)$$

2.9.3.3 *Detailing* Tulangan Torsi Balok

Akibat adanya momen torsi yang terjadi pada balok maka balok membutuhkan tulangan torsi. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.6.4.1 balok yang membutuhkan tulangan torsi adalah balok yang memiliki nilai $T_u \geq \phi T_{th}$.

$$T_{th} = 0,083 \lambda \sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (2.76)$$

Pengecekan kapasitas penampang balok yang menerima torsi perlu dilakukan sesuai SNI 2847-2019 pasal 22.7.7.1.

$$\sqrt{\left(\frac{Vu}{bw d}\right)^2 + \left(\frac{Tu Ph}{1,7 Aoh^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{Vc}{bw d} + 0,66 \sqrt{f'c}\right) \quad (2.77)$$

Tulangan geser yang dibutuhkan akibat torsi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$At = \frac{Tu \times s}{\phi \times 2 Aoh \times fyt} \tan \theta \quad (2.78)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.6.4.2 luas tulangan transversal minimum jika balok membutuhkan tolongan torsi harus diambil dari nilai maksimum diantara dua persamaan berikut.

$$\left(\frac{Av+2 At}{s}\right)_{\min(1)} \geq 0,062 \sqrt{f'c} \frac{bw}{fyt} \quad (2.79)$$

$$\left(\frac{Av+2 At}{s}\right)_{\min(2)} \geq 0,035 \frac{bw}{fyt} \quad (2.80)$$

Tulangan longitudinal yang dibutuhkan akibat torsi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Al = \frac{Tu \times Ph}{\phi \times 2 Ao \times fy} \cot \theta \quad (2.81)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.6.4.3 luas tulangan longitudinal minimum jika balok membutuhkan tolongan torsi harus diambil dari nilai maksimum diantara dua persamaan berikut.

$$Al_{\min(1)} = 0,42 \sqrt{f'c} \frac{Acp}{fyt} - \left(\frac{At}{s}\right) ph \frac{fyt}{fy} \quad (2.82)$$

$$Al_{\min(2)} = 0,42 \sqrt{f'c} \frac{Acp}{fyt} - \left(\frac{0,175 bw}{fyt}\right) ph \frac{fyt}{fy} \quad (2.83)$$

2.9.3.4 Syarat Desain Balok SRPMK

Dalam mendesain struktur SRPMK sesuai SNI 2847-2019 harus memenuhi pasal 18.6 sampai 18.9. Dengan syarat detailing untuk balok sistem rangka pemikul momen khusus adalah pada pasal 18.6.

2.9.3.4.1 Syarat Dimensi Penampang

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.2.1 komponen lentur bagian dari SRPMK harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Panjang bentang bersih (l_n) harus melebihi 4 kali tinggi efektif ($l_n \geq 4d$)
2. Lebar penampang (b_w) tidak kurang dari 0,3 kali tinggi penampang namun tidak diambil kurang dari 250 mm. ($b_w \geq 0,3 h$ atau 250 mm)
3. Lebar penampang (b_w) tidak boleh melebihi lebar kolom pendukung ditambah nilai terkecil dari lebar kolom atau $\frac{3}{4}$ kali dimensi kolom dalam arah sejajar komponen lentur.

2.9.3.4.2 Syarat Tulangan Lentur

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.2.1 terdapat beberapa syarat untuk tulangan lentur balok yaitu:

1. Jumlah tulangan lentur baik di sebelah atas atau di sebelah bawah penampang (A_s) tidak boleh kurang dari:

$$\frac{0,25\sqrt{f_c}}{f_y} b_w d \quad (2.84)$$

$$\frac{1,4}{f_y} b_w d \quad (2.85)$$

Dengan batasan

$$\leq A_g \leq 0,025 b_w d \quad (2.86)$$

Dan paling sedikit harus tersedia dua buah tulangan menerus, baik disisi atas maupun di sisi bawah penampang.

2. Kuat lentur positif komponen struktur lentur pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari setengah kuat lentur negatifnya pada muka tersebut:

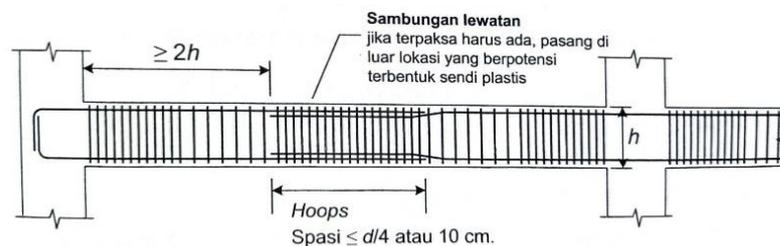
$$\phi M_n^+ K_i \geq \frac{1}{2} \phi M_n^- K_i \quad (2.87)$$

$$\phi M_n^+ K_a \geq \frac{1}{2} \phi M_n^- K_a \quad (2.88)$$

3. Baik kuat lentur negatif maupun kuat lentur positif pada setiap penampang disepanjang bentang tidak boleh kurang dari ¼ kuat lentur terbesar yang disediakan pada kedua muka kolom tersebut.

$$\phi M_n^+ \text{ atau } \phi M_n^- \geq \frac{1}{4} \phi M_n (\text{terbesar disetiap titik}) \quad (2.89)$$

4. Sambungan lewatan pada tulangan lentur hanya diijinkan jika ada tulangan spiral atau sengkang tertutup yang mengikat bagian sambungan lewatan tersebut. Spasi sengkang yang mengikat daerah sambungan lewatan tersebut tidak melebihi $d/4$ atau 100mm. sambungan lewatan tidak boleh diaplikasikan pada daerah hubungan balok-kolom, pada daerah hingga sejarak dua kali tinggi balok dari muka kolom, serta pada tempat yang berdasarkan analisis, menunjukkan kemungkinan terjadi leleh lentur akibat perpindahan inelastik struktur rangka. Sambungan lewatan untuk balok dapat dilihat pada Gambar 2.14 (Imran & Hendrik, 2016).

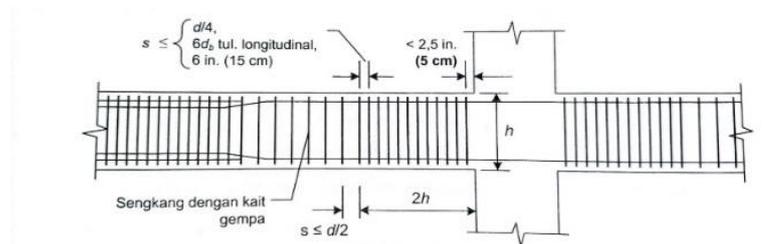


Gambar 2. 18 Sambungan Lewatan

2.9.3.4.3 Syarat Tulangan Transversal

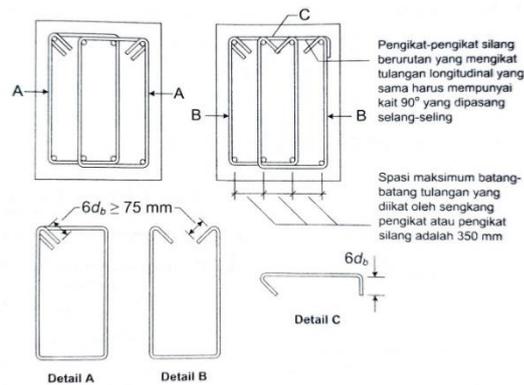
Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.4 terdapat beberapa syarat tulangan transversal yaitu:

1. Sengkang pengekok harus disediakan pada daerah hingga dua kali tinggi balok diukur dari muka tumpuan pada kedua ujung komponen struktur lentur. Selin itu sengkang pengekok juga harus dipasang disepanjang daerah dua kali tinggi balok pada kedua sisi dari suatu penampang, pada tempat yang diharapkan dapat terjadi leleh lentur (lokasi sendi plastis)
2. Sengkang tertutup pertama harus dipasang tidak lebih dari 50 mm dari muka tumpuan. Jarak antar sengkang tertutup tidak boleh melebihi nilai terkecil antara $d/4$, $6d_b$, dan 150 mm.
3. Pada daerah yang tidak memerlukan sengkang pengekok, sengkang dengan kait gempa pada kedua ujungnya harus dipasang dengan jarak tidak lebih dari $d/2$ di sepanjang bentang komponen struktur lentur. Syarat tulangan lentur balok dapat dilihat pada Gambar 2.15 (Imran & Hendrik, 2016).



Gambar 2. 19 Syarat Tulangan Transversal

4. Sengkang tertutup dapat terdiri dari dua buah tulangan yaitu sebuah sengkang dengan kait gempa pada kedua ujung dan ditutup oleh pengikat silang. Pada pengikat silang yang berurutan yang mengikat tulangan memanjang yang sama, kait 90° nya harus dipasang berselang-seling. Contoh Sengkang tertutup yang dipasang bertumpuk dapat dilihat pada Gambar 2.16 (Imran & Hendrik, 2016).



Gambar 2. 20 Contoh Sengkang Tertutup yang Dipasang Bertumpuk
2.9.3.4.4 Kuat Geser

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.5 tulangan transversal untuk SRPMK harus didesain untuk memikul gaya geser rencana, (V_e) yang ditimbulkan oleh kuat lentur maksimum (M_{pr}) dengan tanda berlawanan yang dianggap bekerja pada muka-muka tumpuan. Pada saat yang bersamaan komponen struktur tersebut dianggap memikul beban gravitasi terfaktor di sepanjang bentangnya. M_{pr} merupakan kuat momen lentur diujung balok yang ditentukan dengan menganggap kuat atrik pada tulangan memanjang sebesar minimum $1,25f_y$ dan faktor reduksi bernilai 1.

$$M_{pr} = A_s (1,25 f_y) \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.90)$$

$$a = \frac{A_s (1,25 f_y)}{0,85 f_c b} \quad (2.91)$$

Gaya geser rencana dapat dihitung dengan mengasumsikan saat gempa terjadi maka struktur akan mengalami goyangan baik ke kiri ataupun ke kanan. Sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung gaya geser desain akibat adanya gerakan ke kiri dan ke kanan adalah sebagai berikut:

Goyangan ke kiri

$$V_{ki} = \frac{M_{pr}^- + M_{pr}^+}{l_n} + \frac{q_u l_n}{2} \quad (2.92)$$

$$V_{ka} = \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{l_n} - \frac{q_u l_n}{2} \quad (2.93)$$

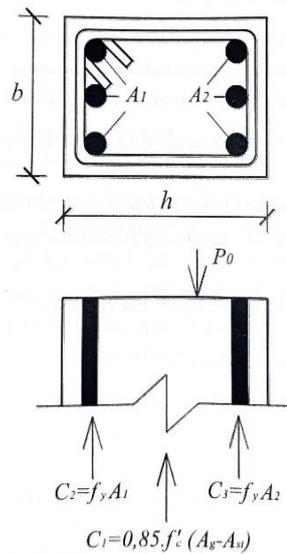
Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.6.5.2 kuat geser yang disumbangkan oleh beton (V_c) dapat diambil sama dengan nol apabila gaya geser akibat gempa lebih besar atau sama dengan 50% dari kuat geser perlu maksimum disepanjang daerah tersebut, apabila gaya aksial tekan terfaktor, termasuk akibat gempa lebih kecil dari $A_g f_c / 20$.

2.9.4 *Detailing* Tulangan Kolom

Kolom merupakan elemen struktur yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur. Kolom juga merupakan elemen utama yang memikul beban lateral pada gedung. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 10.6.1.1, batas minimum rasio tulangan adalah 1% dan batas maksimum adalah 6% untuk kasus umum.

2.9.4.1 Kondisi Aksial Tekan Sentris

Berdasarkan SNI 2847-2019 secara umum kuat dari kolom yang dibebani secara sentris P_0 , dapat ditulis berdasarkan pasal 22.4.2.2. Interaksi beban pada kolom dapat dilihat pada Gambar 2.17 (Lesmana, 2020).



Gambar 2. 21 Concentrically Loaded Short Column

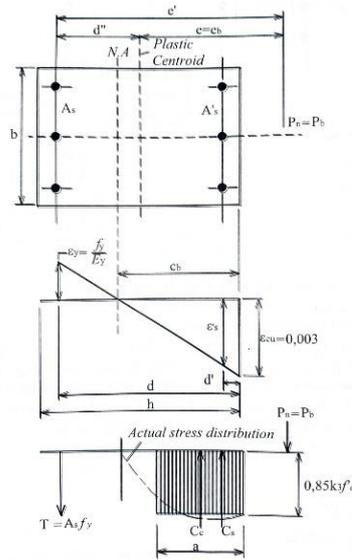
Penampang dibebani oleh P_0 secara sentris sehingga membuat kolom memberikan reaksi perlawanan yang berasal dari tulangan baja dan beton.

$$P_0 = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y \quad (2.94)$$

Luasan penampang kolom dinyatakan $A_g = b \times h$ dan $A_{st} = (A_1 + A_2)$. Sedangkan faktor 0,85 merupakan perbandingan antara kuat tekan kolom dengan kuat tekan tes silinder. Berdasarkan SNI 2847-2019 pada tabel 22.4.2.1 kuat nominal yang digunakan dalam desain tidak boleh melebihi $0,8 P_0$.

2.9.4.2 Kondisi Regangan Berimbang

Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*) merupakan pembatas antara *compression controlled* dan *transition zone* pada diagram interaksi kolom. Kondisi ini serat tekan beton dan serat tarik tulangan baja terluar mencapai keadaan batasnya yaitu $\epsilon_c = 0,003$ dan $\epsilon_{ey} = f_s/E_s$. Kondisi regangan berimbang kolom dapat dilihat pada Gambar 2.18 (Lesmana, 2020).



Gambar 2. 22 Kondisi Regangan Berimbang untuk Penampang Persegi
Kondisi regangan berimbang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{\left(\frac{f_y}{E_s}\right) + 0,003} \quad (2.95)$$

$$c_b = \frac{0,003}{\left(\frac{f_y}{200.000}\right) + 0,003} d = \frac{600 d}{600 + f_y} \quad (2.96)$$

Gaya-gaya yang terlibat dalam kondisi ini memiliki persamaan:

$$P_b = C_c + C_s - T \quad (2.97)$$

dengan:

$$C_c = 0,85 f'_c \beta_1 c_b b \quad (2.98)$$

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85 f'_c) \quad (2.99)$$

$$T = A_s f_y \quad (2.100)$$

sehingga penjabaran yakni sebagai berikut:

$$P_b = 0,85 f'_c \beta_1 c_b b + A'_s (f_y - 0,85 f'_c) - A_s f_y \quad (2.101)$$

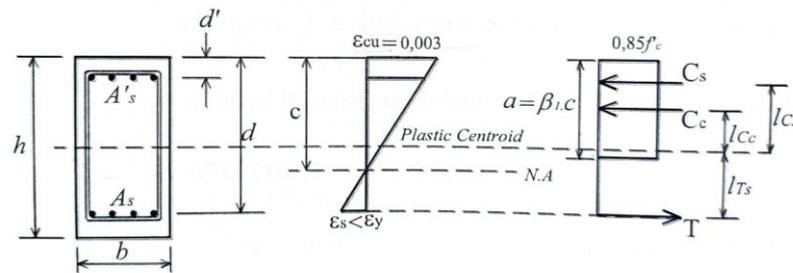
Persamaan momen dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$M_b = P_b e_b \quad (2.102)$$

$$M_b = C_c \left(\frac{d}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{d}{2} - d_s' \right) + T_s \left(\frac{d}{2} - d_s \right) \quad (2.103)$$

2.9.4.3 Kondisi Keruntuhan Tekan

Dalam kondisi keruntuhan tekan, nilai gaya tekan (P_n) melebihi dari kondisi seimbang (P_b). Eksentrisitas (e) lebih kecil dibandingkan dengan eksentrisitas kondisi seimbang (e_b), $e < e_b$. Tegangan pada tulangan tarik (f_s) lebih kecil daripada tulangan leleh (f_y), ($f_s < f_y$). Tipe keruntuhan tekan ini terjadi pada saat beton hancur sedangkan tulangan baja tarik belum leleh. Sumbu netral bergerak mendekati tulangan tarik yang akan menambah luas daerah tekan beton sehingga jarak ke serat tekan beton akan melebihi jarak pada kondisi balance ($c > c_b$). Kolom dengan kondisi keruntuhan tekan dapat dilihat pada Gambar 2.19 (Lesmana, 2020).



Gambar 2. 23 Kolom Kondisi Keruntuhan Tekan

Pada kondisi ini, persamaan tegangan-regangan tulangan tarik adalah:

$$\epsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) \times \epsilon_{cu} \quad (2.104)$$

Jika nilai $\epsilon_s > \epsilon_y$ maka tulangan leleh dan sesuai dengan kondisi tension controlled.

Maka tegangan pada tulangan tarik menjadi:

$$f_s = f_y \quad (2.105)$$

Persamaan regangan tulangan tekan adalah:

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{c-d'}{c} \right) \times \varepsilon_{cu} \quad (2.106)$$

Jika nilai $\varepsilon'_s < \varepsilon_y$ maka tulangan tidak leleh dan sesuai dengan kondisi *tension controlled*. Maka tegangan pada tulangan tekan menjadi:

$$f'_s = \varepsilon'_s \times E_s \quad (2.107)$$

Gaya tekan dari tulangan tekan:

$$A'_s = n \frac{1}{4} \pi D_2^2 \quad (2.108)$$

$$C_s = A'_s (f_y - 0,85 f_c) \quad (2.109)$$

Gaya tarik dari tulangan tarik:

$$T = A_s f_y \quad (2.110)$$

Gaya tekan dari beton:

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot a \cdot b \quad (2.111)$$

Kapasitas aksial tekan nominal dalam kondisi *tension controlled*:

$$P_n = C_c + C_s - T \quad (2.112)$$

Kapasitas momen nominal *tension controlled*:

$$M_n = C_c \left(\frac{d}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{d}{2} - d_s' \right) + T_s \left(\frac{d}{2} - d_s \right) \quad (2.113)$$

2.9.4.4 Desain Geser Kolom

Konsep desain geser kolom ini hampir sama dengan konsep desain geser balok. Yang menjadi perbedaan yaitu besaran nilai kuat geser yang berasal dari material beton (V_c). Elemen kolom memikul kombinasi beban aksial tekan dan momen lentur maka dari itu nilai dari V_c berbeda dengan desain geser balok yang hanya berfokus pada momen lentur. Adapun persamaan geser kolom sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g}\right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.114)$$

Terkait kebutuhan tulangan geser kolom ditandai bila:

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.115)$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser terfaktor

N_u = Gaya aksial terfaktor

$\lambda = 1,0$ (beton normal) $d = 0,8h$

ρ_w = Rasio As terhadap bwd

2.9.4.5 Syarat Desain Kolom SRPMK

Dalam mendesain struktur SRPMK sesuai SNI 2847-2019 harus memenuhi pasal 18.6 sampai 18.9. Dengan syarat detailing untuk kolom sistem rangka pemikul momen khusus adalah pada pasal 18.7. Pada konsep desain kolom SRPMK kolom harus didesain agar lebih kuat dari balok, namun tetap perlu diberi kekangan selayaknya pada zona sendi plastis balok.

2.9.4.5.1 Syarat Dimensi Penampang Kolom

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.2.1 penampang kolom harus memenuhi syarat:

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 tidak kurang dari 0,4.

2.9.4.5.2 Syarat Kuat Lentur Kolom

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.3.2 kekuatan lentur kolom harus memenuhi:

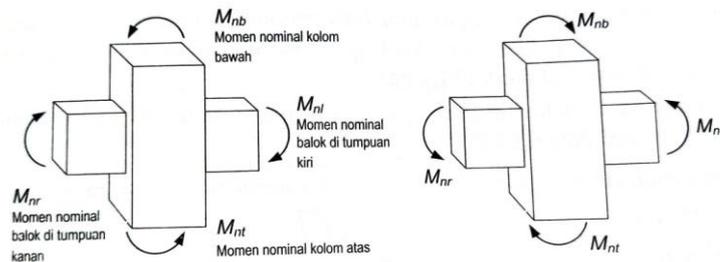
$$\sum M_{nc} \geq (1,2)\sum M_{nb} \quad (2.116)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = Jumlah kekuatan lentur nominal kolom-kolom yang merangka ke dalam joint, yang dievaluasi dimuka-muka joint

$\sum M_{nb}$ = Jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam joint, yang dievaluasi dimuka-muka joint

Merupakan persyaratan *strong column weak beam*. Konsep momen yang bekerja pada kolom dan balok dapat dilihat pada Gambar 2.20 (Imran & Hendrik, 2016).



Gambar 2. 24 Konsep Strong Column Weak Beam

2.9.4.5.3 Syarat Tulangan Lentur

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.4 mensyaratkan tulangan lentur untuk kolom adalah sebagai berikut:

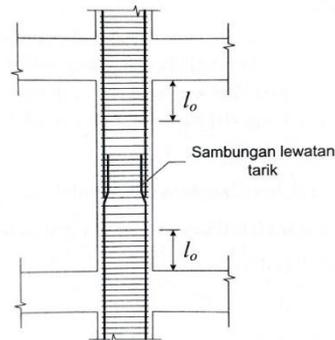
1. Luas tulangan longitudinal A_{st} tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$.
2. Pada kolom-kolom dengan sengkang bundar, jumlah batang tulangan longitudinal minimum harus 6.
3. Sambungan mekanis harus memenuhi 18.2.7 dan sambungan las 18.2.8. Sambungan lewatan diizinkan hanya dalam daerah tengah tinggi kolom.

2.9.4.5.4 Syarat Tulangan Transversal

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.5.1 mensyaratkan bahwa pada daerah sendi plastis kolom (daerah sepanjang l_o dari muka hubungan balok-kolom, dikedua ujungnya) harus disediakan tulangan transversal yang mencukupi. Panjang l_o daerah sendi plastis kolom diambil tidak kurang dari nilai terkecil dari:

1. Tinggi penampang komponen struktur pada muka hubungan balok-kolom atau pada segmen yang memiliki potensi terjadi leleh lentur.
2. $1/6$ dari bentang bersih komponen struktur.
3. 450 mm.

Sambungan lewatan pada kolom dapat dilihat pada Gambar 2.21 (Imran & Hendrik, 2016).



Gambar 2. 25 Sambungan Lewatan Pada Kolom

Persyaratan mengenai tulangan transversal juga diatur dalam SNI 2847-2019 mengenai pasal 18.7.5.2 yaitu bahwa tulangan transversal harus terdiri dari tulangan spiral tunggal atau spiral saling tumpang (*overlap*), sengkang pengekang bundar, atau sengkang pengekang persegi, dengan atau tanpa ikat silang. Setiap tekukan ujung sengkang persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar. Ikatan silang yang berurutan harus diselang-seling ujungnya sepanjang tulangan longitudinal dan sekeliling perimeter penampang. Dengan syarat jarak antar tulangan transversal tidak melebihi 350 mm.

2.9.4.5.5 Jarak Tulangan Transversal Pada Daerah l_0

Jarak tulangan transversal pada daerah sepanjang l_0 , harus diambil tidak melebihi nilai terkecil dari:

1. $\frac{1}{4}$ dimensi terkecil komponen struktur
2. 6 kali diameter tulangan memanjang
3. $100 \text{ mm} \leq S_0 = 100 + \left(\frac{350-hx}{3}\right) \leq 150 \text{ mm}$

Persyaratan tulangan transversal juga dapat dilihat pada SNI 2847-2019 pasal 18.7.5.4 seperti pada Tabel 2.24.

Tabel 2. 24 Persyaratan Tulangan Transversal

Tulangan Transversal	Kondisi	Persamaan yang Berlaku	
A_{sh}/S_{bc} untuk sengkang persegi	$P_u < 0,3 A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70$ MPa	Terbesar dari (a) dan (b)	$0,3 \frac{\left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1\right) f'_c}{f_{yt}}$ (a)
	$P_u > 0,3 A_g f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa	Terbesar dari (a), (b), dan (c)	$0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (b) $0,2 k_f kn \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$ (c)
ρ untuk spiral atau sengkang pengekan lingkaran	$P_u < 0,3 A_g f'_c$ dan $f'_c \leq 70$ MPa	Terbesar dari (d) dan (e)	$0,45 \frac{\left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1\right) f'_c}{f_{yt}}$ (d)
	$P_u > 0,3 A_g f'_c$ dan $f'_c > 70$ MPa	Terbesar dari (d), (e), dan (f)	$0,12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (e) $0,35 K_f K_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$ (f)

Dengan faktor k_f dan k_n dinyatakan dengan persamaan:

$$K_f = \frac{f'_c}{175} + 0,6 \geq 1,0 \text{ (diambil paling minimum bernilai 1)} \quad (2.117)$$

$$K_n = \frac{n_1}{n_1 - 2} \quad (2.118)$$

2.9.4.5.6 Jarak Tulangan Transversal Pada Diluar Daerah l_0

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.5.5 untuk daerah diluar panjang l_0 , kolom harus diberi tulangan spiral atau sengkang dengan spasi s yang tidak melebihi nilai terkecil dari $6d_b$ dan 150 mm, kecuali bila jumlah tulangan transversal yang lebih besar disyaratkan pada SNI 2847-2019 pada pasal 18.7.4.3 atau 18.7.6.

2.9.4.5.7 Kekuatan Geser

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.7.6.1 menyatakan bahwa tulangan transversal harus didesain untuk memikul gaya geser rencana (V_e) yang ditentukan menggunakan kuat momen maksimum (M_{pr}) dari komponen struktur tersebut yang terkait dengan rentang beban-beban aksial terfaktor yang bekerja, (P_u).

$$V_e = \frac{M_{prc\ a} + M_{prc\ b}}{l_c} \quad (2.119)$$

Keterangan:

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

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

l_c = Panjang kolom yang ditinjau

Gaya geser rencana tidak perlu lebih besar daripada gaya geser rencana maksimum (M_{pr}) dari komponen struktur balok yang merangka pada hubungan balok-kolom tersebut dan tidak boleh lebih kecil dari geser faktor yang dihasilkan melalui perhitungan analisis struktur. Nilai M_{pr} untuk kolom ditentukan dengan menganggap kuat tarik pada tulangan memanjang sebesar minimum $1,25f_y$ dan faktor reduksi bernilai 1. Pada saat memperhitungkan kekuatan geser dari penampang, terdapat dua jenis sumbangan kekuatan geser yaitu yang berasal dari penampang dan dari tulangan. Namun menurut SNI 2847-2019 pasal 18.7.5.1 jika

syarat 1 dan 2 terpenuhi maka tulangan transversal sepanjang l_0 harus didesain untuk menahan geser dengan mengasumsikan $V_c = 0$, syarat tersebut adalah:

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

2.9.5 Detailing Hubungan Balok Kolom

Tulangan yang digunakan pada hubungan balok kolom sama dengan jumlah tulangan transversal yang dibutuhkan pada ujung-ujung kolom. Namun, luas tulangan transversal yang digunakan dapat direduksi berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.8.3.2 jika terdapat balok pada keempat sisi *joint* yang merangka dan mengekang *joint* tersebut. Luas efektif hubungan balok kolom (*joint*) dihitung berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 18.8.4.3 sesuai Persamaan 2.120.

$$A_j = h_j \times b_j \quad (2.120)$$

Keterangan:

$$A_j = \text{luas efektif } joint \text{ (m}^2\text{)}$$

$$h_j = \text{panjang efektif } joint \text{ (m)}$$

$$b_j = \text{lebar efektif } joint \text{ (m)}$$

Gaya dalam yang bekerja pada hubungan balok kolom dihitung sesuai dengan SNI 2847-2019 pasal 18.8.2.1 dimana untuk gaya geser yang dihasilkan oleh balok menggunakan tegangan baja sebesar $1,25 f_y$. Untuk geser yang dihasilkan kolom didapatkan dari Persamaan 2.121.

$$V_{col} = \frac{(M_{pr\ ba} \times DF_{ba}) + (M_{pr\ bb} \times DF_{bb})}{l_n} \quad (2.121)$$

Selanjutnya gaya geser yang terjadi pada hubungan balok kolom harus dipastikan tidak melebihi nilai kapasitas gesernya. Nilai kapasitas geser *joint* dapat dihitung dengan Persamaan 2.122.

$$V_n = 1 \times \lambda \times \sqrt{f_c} \times A_j \quad (2.122)$$

2.10 Pondasi

Pondasi merupakan struktur bawah dari suatu bangunan. Pondasi merupakan struktur bangunan yang berhubungan langsung dengan tanah dan berfungsi untuk menyalurkan beban-beban yang diterima dari struktur atas ke tanah. Pondasi harus dirancang dengan baik agar dapat menahan beban yang diberikan oleh struktur atas.

2.10.1 Jenis Pondasi

Jenis pondasi berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 13.1.1 untuk struktur gedung dapat dibagi menjadi pondasi dangkal (*shallow foundation*) dan pondasi dalam (*deep foundation*).

2.10.1.1 Pondasi Dangkal

Pondasi dangkal digunakan jika keberadaan tanah keras berada dekat dengan permukaan tanah sehingga tidak memerlukan penggalian tanah yang dalam. Pondasi dangkal terdiri dari berbagai macam.

2.10.1.1.1 Pondasi Lajur atau Menerus

Merupakan jenis pondasi dangkal yang berbentuk memanjang mengikuti struktur atas. Pondasi lajur digunakan jika kolom terletak dalam satu garis dan berdekatan. Pondasi lajur mirip dengan pondasi batu kali namun pondasi ini dapat memikul momen.

2.10.1.1.2 Pondasi Setempat

Pondasi setempat atau pondasi telapak merupakan pondasi dangkal dimana pondasi memikul sebuah beban kolom tunggal. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 13.3.1.2 pondasi ini umumnya berbentuk persegi dengan ketebalan minimum 150 mm.

2.10.1.1.3 Pondasi Gabungan

Pondasi gabungan merupakan pondasi dangkal yang digunakan jika terdapat dua buah kolom yang berdekatan dan jika digunakan pondasi telapak amak posisi antara kedua pondasi akan sangat dekat sehingga digunakan pondasi gabungan yaitu pondasi yang saling bertabrakan.

2.10.1.1.4 Pondasi Rakit

Pada saat saya dukung tanah rendah akan emmbuat dimensi pondasi yang digunakan akan menjadi besar. Hal ini membuat banyak pondasi akan bertabrakan, sehingga digunakan pondasi rakit. Ada beberapa jenis pondasi rakit yang bisa digunakan, antara lain pelat datar, jenis pelat dengan balok dan sistem sel.

2.10.1.2 Pondasi Dalam

Pondasi dalam digunakan jika keberadaan tanah keras berada jauh dari permukaan tanah sehingga diperlukan media tambahan untuk menyalurkan beban yang diterima ke tanah keras berupa tiang pancang. Pondasi dalam terdiri dari berbagai macam.

2.10.1.2.1 Pondasi *Caissons (Bor Pile)*

Pondasi *bor pile* merupakan pondasi dalam yang metode pengerjaanya diawali dengan pengebor tanah dengan diameter lubang yang sesuai dengan diameter tiang beton yang direncanakan. Setelah dilakukan pengeboran, maka besi

tulangan dimasukkan kedalam lobang, kemudian dilakukan pengecoran ditempat. Hal penting yang harus diperhatikan adalah menjaga mutu beton yang dicor kedalam tanah.

2.10.1.2.2 Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang merupakan pondasi dalam yang menggunakan beton *precast* sebagai media tiang yang ditanam. Dengan cara ini maka mutu beton yang digunakan dapat lebih terjamin.

2.10.2 Pemilihan Jenis Pondasi

Pemilihan jenis pondasi yang digunakan didasarkan dengan beberapa hal antara lain berdasarkan letak tanah keras, kemudahan pelaksanaan, biaya konstruksi dan kinerja pondasi tersebut. Selain faktor teknis tersebut terdapat faktor lain yang perlu diperhatikan yaitu seperti kemudahan transportasi untuk mengakses jalan menuju proyek. Selain itu faktor lingkungan juga mempengaruhi pemilihan jenis pondasi yang digunakan. Jika lingkungan sekitar merupakan lingkungan padat penduduk maka pondasi tiang pancang tidak disarankan karena akan mengganggu lingkungan sekitar.

2.10.3 Perencanaan Pondasi Tiang Pancang

Perencanaan pondasi taing pancang harus didasari oleh daya tanah dan beban yang akan disalurkan ke tanah. Untuk menghitung daya dukung tanah dihitung per lapisan tanah,

Daya dukung ultimit untuk suatu tiang pancang dihitung dengan persamaan

berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s - W_c \quad (2.123)$$

Keterangan:

Q_u = daya dukung tiang (ton)

Q_p = daya dukung ujung tiang (ton)

Q_s = daya dukung selimut tiang (ton)

W_c = Berat tiang pancang (ton)

Nilai Q_p dan Q_s dicari menggunakan metode Decourt-Quaresma 1982.

$$Q_p = (\alpha \times K_{dp} \times N_p \times A_b) \quad (2.124)$$

$$Q_s = \sum (\beta_i \times 10 \times \left(\frac{N_i}{3} + 1\right) \times A_{s,i}) \quad (2.125)$$

Keterangan:

α = koefisien dasar tiang sesuai Tabel 2.26

K_{dp} = koefisien karakteristik tanah sesuai Tabel 2.27

N_p = nilai rata-rata N-SPT 4D diatas hingga 4D dibawah tiang

A_b = luas tiang (m^2)

β_i = koefisien selimut tiang sesuai tabel Tabel 2.28

N_i = nilai N-SPT disepanjang tiang tertanam dengan batasan $3 < N < 50$

Tabel 2. 25 Nilai Koefisien α

Piles	α For Sand	α For Clay	α For Silt
<i>Prefabricated driven piles or steel piles</i>	1	1	1
<i>Franki piles</i>	1	1	1
<i>Driven wooden piles</i>	1	1	1
<i>Vibrating or vibropressed</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Steel tubular piles</i>	1	1	1
<i>Continuous flight auger piles (CFA)</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Bored piles or piles sheeted by bentonite suspense</i>	0,5	0,85	0,6
<i>Bored piles with steel casing</i>	0,5	0,85	0,6

Tabel 2. 26 Nilai Koefisien K_{dp}

Soil Type	K_{dp} (KPa)
<i>Sand</i>	400
<i>Clay</i>	120
<i>Silt</i>	200

Tabel 2. 27 Nilai Koefisien β

Piles	β For Sand	β For Clay	β For Silt
<i>Prefabricated driven piles or steel piles</i>	1	1	1
<i>Franki piles</i>	1	1	1
<i>Driven wooden piles</i>	1	1	1
<i>Vibrating or vibropressed</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles</i>	1	1	1
<i>Cast in place screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Prefabricated screw piles with additional grouting</i>	1	1	1
<i>Steel tubular piles</i>	1	1	1
<i>Continuous flight auger piles (CFA)</i>	1	1	1
<i>Bored piles or piles sheeted by bentonite suspense</i>	0,5	0,8	0,65
<i>Bored piles with steel casing</i>	0,5	0,8	0,65

Setelah daya dukung 1 tiang diperhitungkan, maka nilai daya dukung tersebut harus dibagi dengan suatu faktor keamanan (SF) untuk menghasilkan daya dukung izin.

$$Q_{izin} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2.126)$$

Namun nilai daya dukung izin tidak boleh melebihi nilai daya dukung bahan tiang pancang yang bisa didapatkan nilainya dari *brosure* tiang pancang yang digunakan.

$$Q_{izin} \leq Q \text{ (izin tiang)} \quad (2.127)$$

Daya dukung tiang akan dihitung secara tunggal terlebih dahulu lalu nantinya akan dihitung kembali daya dukung dari tiang kelompok. Untuk mencari daya dukung kelompok tiang maka nilai daya dukung 1 tiang perlu dikoreksi terlebih dahulu dengan mengalikan dengan nilai efisiensi kelompok tiang. Hal ini dikarenakan saat tiang bekerja pada suatu kelompok nilai daya dukung yang bekerja tidak secara penuh melainkan terjadi reduksi akibat keberadaan tiang sekita yang juga bekerja bersamaan. Nilai efisiensi kelompok tiang dapat dihitung dengan rumus Converse-Labbare sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \left(\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n} \right) \theta \quad (2.128)$$

Keterangan:

E_g = efisiensi tiang pancang group

θ = $\tan^{-1} (D/s)$

m = jumlah tiang dalam baris

n = jumlah tiang dalam satu kolom

D = diameter tiang (m)

s = Jarak antar tiang (m)

Selanjutnya dilakukan pengecekan apakah jumlah tiang yang digunakan dalam satu kelompok sudah mampu menahan beban yang diterima dari struktur atas. Beban yang akan dibebankan pada masing-masing tiang pancang berupa beban aksial dan beban momen sesuai SNI 2847-2019 pasal 13.4.1.1.

$$P_{total} = \frac{P_u}{n} + \frac{M_x \times y}{\sum y^2} + \frac{M_y \times x}{\sum x^2} \quad (2.129)$$

Keterangan:

P_{total} = beban total pada 1 tiang pancang (ton)

P_u = beban aksial total (ton)

n = jumlah tiang dalam 1 kelompok

M_x = momen arah x (ton.m)

M_y = momen arah y (ton.m)

2.10.4 Perencanaan Pile Cap

Perencanaan *pile cap* dapat dilakukan sesuai SNI 2847-2019 pasal 13.4.2. Ketebalan *pile cap* tidak kurang dari 300 mm. Perhitungan momen lentur dan gaya geser pada *pile cap* didasarkan pada asumsi bahwa reaksi dari masing-masing tiang pancang terpusat pada pusat berat penampang tiang pancang. Tahanan geser *pile cap* dapat dihitung berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 22.6.5.2 dan diambil nilai V_c terkecil.

$$V_{c(1)} = 0,33 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \quad (2.130)$$

$$V_{c(2)} = 0,17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \quad (2.131)$$

$$V_{c(3)} = 0,083 \times \left(2 + \frac{\alpha_s \times d}{b_o}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \quad (2.134)$$